Ensayos de óptica
Newton y la naturaleza de la luz

Universidad Autónoma de Chihuahua

M.E. Luis Alberto Fierro Ramírez
Rector

M.C. Francisco Márquez Salcido
Secretario General

M.A.V. Raúl Sánchez Trillo
Director de Extensión y Difusión Cultural

M A. Herik Germán Valles Baca
Director Académico

M.P.E.A. Alfredo Ramón Urbina Valenzuela
Director de Investigación y Posgrado

M.I. Ricardo Ramón Torres Knight
Director de Planeación y Desarrollo Institucional

M.F. Jesús Ubaldo Casillas García
Director Administrativo

Ensayos de óptica
Newton y la naturaleza de la luz

Heriberto Ramírez
compilador

Iván Rodríguez Rodríguez
traductor

Universidad Autónoma de Chihuahua
Universidad Nacional Autónoma de México
Chihuahua, México, 2016

Ensayos de óptica : Newton y la naturaleza de la luz / Heriberto Ramírez, compilador; Iván Rodríguez Rodríguez, traductor. – Primera edición.
272 páginas
ISBN 978-607-9424-95-4 (Universidad Autónoma de Chihuahua).
ISBN 978-607-02-8593-6 (UNAM).
1. Óptica. 2. Luz. 3. Newton, Isaac, Sir, 1642-1727. I. Ramírez, Heriberto, editor.
II. Rodríguez Rodríguez, Iván, traductor.
QC355.3.E57 2016
LIBRUNAM 1924050

Primera edición: 7 de noviembre de 2016

Editorial. Dirección de Extensión y Difusión Cultural
Director: Raúl Sánchez Trillo
Jefe Editorial: Heriberto Ramírez Luján
Producción: Martha Estela Torres Torres

Traducción: Iván Rodríguez Rodríguez
Diseño de portada: Ángel Machado
Diseño editorial: Jorge Villalobos

Derechos reservados
© Heriberto Ramírez Luján, por la compilación
© Iván Rodríguez Rodríguez, por la traducción

D. R. © Universidad Autónoma de Chihuahua
Campus Universitario Antiguo s/núm.
Chihuahua, Chih., México. CP 31178
Correo: editorial@uach.mx
Tel. (614) 439-1853
Facultad de Filosofía y Letras de la UACh

D. R. © Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad Universitaria, 04510, Ciudad de México
Dirección de Publicaciones y Fomento Editorial
Av. del IMAN núm. 5, 04510, Ciudad de México

ISBN Universidad Autónoma de Chihuahua: 978-607-9424-95-4
ISBN Universidad Nacional Autónoma de México: 978-607-02-8593-6

Prohibida la reproducción o transmisión total o parcial del contenido de esta obra por cualquier medio, sea electrónico o mecánico, en cualquier forma, sin permiso previo por escrito del autor y de la Universidad Autónoma de Chihuahua.

Impreso y hecho en México.

Para Ariadna.

A mis maestros, colegas y amigos
que me han brindado la oportunidad de aprender de ellos;
y a todos mis estimados estudiantes
con los cuales he tenido la oportunidad
de convivir a lo largo de mi vida.

H. R.

Índice

Prólogo 11

Presentación 15

De "De los colores" 25

Nueva teoría acerca de la luz y los colores 33

"Hipótesis que explica las propiedades de la luz tratadas en varios de mis ensayos" 57

Thomas S. Kuhn
Los documentos de óptica de Newton 95

Richard S. Westfall
El desarrollo de la teoría del color de Newton 119

Alan E. Shapiro
Definición de Newton de un rayo de luz y las teorías de difusión de la dispersión cromática 153
La óptica de Newton y el atomismo 183

Hideto Nakajima
Dos tipos de la teoría de la modificación de la luz: algunas nuevas observaciones sobre la controversia Newton-Hooke de 1672 con respecto a la naturaleza de la luz 219

August Ziggelaar
El debate inicial con respecto a la teoría ondulatoria 249

Prólogo

Aunque sin duda todos coincidimos en la importancia de la física newtoniana para el desarrollo de la nueva ciencia, tal vez no hemos reparado en la compleja trama contextual en que se dan sus propuestas. Es por ello que considero que *Ensayos de óptica* de Newton es un texto que viene a llenar un hueco fundamental, no sólo en el ámbito de la historia y la filosofía de la ciencia, sino en el de las ciencias físicas, ya que en nuestro medio, en otra etapa, era difícil tener acceso a los textos que hoy día están disponibles en sitios especializados de internet, y, por otro lado, el lenguaje en las diversas traducciones constituía también un obstáculo.

Por esta razón me parece un acierto poner al alcance de los hispanohablantes algunos de los textos de óptica más relevantes de Newton, así como los de sus más conspicuos comentaristas y estudiosos como Kuhn, Westfall, Cohen, Shapiro y críticos más contemporáneos de estos últimos como Nakajima y Ziggelaar, lo que permite contar con una importante guía para una lectura más completa y adecuada de los textos traducidos.

La selección de los textos de óptica es pertinente, ya que nos deja ver la evolución de las ideas de Newton, así como el contexto en el cual se fueron produciendo y desarrollando.

Además, constituye un acierto que en la explicación preliminar se exhiba una tesis fundamental para la comprensión de las propuestas ópticas de Newton: que "la investigación óptica se aparta del estilo newtoniano", esto es, del ir y venir del modelo matemático a la realidad, y más bien, de lo que se trata es de explicar las propiedades de la luz fundadas en hipótesis que explican una amplia colección de fenómenos.

Desde luego, para esclarecer esta tesis central ayuda el importante estudio de Kuhn, quien considera que las hipótesis se introducen porque el tema de los colores no podía ser tratado de otra manera.

La estructura de esta recopilación de textos de y sobre Newton ofrece un hilo conductor a través del atomismo, desde la antigüedad: Leucipo y Demócrito, pasando por el atomismo epicúreo de Gassendi y Descartes hasta llegar a Newton. Esto se acompaña de una interesante tesis historiográfica ya que para los autores:

> Las tradiciones mantienen ciclos en los cuales desaparecen y aparecen con nuevos y viejos ideales epistémicos, pero mantienen su raíz ontológica, en este caso los corpúsculos o las partículas de la materia, las cuales son utilizadas por Newton para explicar el comportamiento de la luz, teniendo como base una fuerte carga experimental para legitimar sus tesis. La etapa newtoniana de esta tradición sentó un precedente que se mantiene hasta nuestros días.[1]

Este libro resulta fundamental para conocer el desarrollo de las ideas de Newton. Por ejemplo, en su obra más acabada en cuestiones de óptica, *Opticks*, rechaza la teoría ondulatoria de la luz y por tanto descalifica tanto a Descartes como a Hooke. No obstante, en el texto *Hipótesis que explican las propiedades de la luz tratadas en varios de mis ensayos* –recopilado en este libro –, Newton expresa lo siguiente:

> Ahora bien, si se supone que el movimiento del rayo aumenta o disminuye en este pasaje en cierta proporción, de acuerdo con la diferencia de las densidades de los medios etéreos, y la adición o detracción del movimiento se puede suponer en la perpendicular de las superficies refractantes, como debería ocurrir, los senos de incidencia y refracción serán proporcionales, de acuerdo con lo que ha demostrado Descartes.[2]

Naturalmente las leyes de reflexión y refracción cartesianas se ubican en la perspectiva de una teoría ondulatoria, aunque Descartes hizo algunas incursiones en la perspectiva corpuscular.

Lo interesante finalmente es que ni todo es aceptación, ni todo es rechazo definitivo, como bien señalan los autores en su propuesta historiográfica. Es por ello que se requiere una más informada y completa presentación de los temas y autores del estudio para no caer en simplificaciones que limiten la visión en torno al desarrollo de las ideas científicas.

Dra. Laura Benítez
Instituto de Investigaciones Filosóficas UNAM
2015

N O T A S

[1] Newton, Isaac: *Ensayos ópticos*. Comp. Heriberto Ramírez. Trad. Iván Rodríguez. Universidad Autónoma de Chihuahua, México, 2014, p. 23.
[2] Op. cit., p. 67.

Presentación

En su conjunto la obra de Isaac Newton se antoja inconmensurable. Los estudios canónicos trazan de manera tradicional tres líneas vertebrales: su teoría óptica, el cálculo infinitesimal y la teoría de la gravitación; aunque algunos más recientemente han insistido en sus numerosos escritos sobre religión.

La presente compilación reúne tres textos fundacionales de Newton, en los cuales se recogen sus intensas y prolongadas cavilaciones en torno a los fenómenos ópticos y su experimento crucial. "De los colores" es un testimonio de sus investigaciones tempranas en torno al color, consiste en anotaciones hechas en 1665-6. Acompañan el nacimiento de las primeras inquietudes de Newton sobre la naturaleza de los colores desarrolladas en su primer cuaderno *Quaestiones Quaedam Philosophicae*. Apreciamos a un Newton estructurando diversas notas tomadas de las *Cuestiones* a manera de ensayo de una nueva idea y dando indicios de nuevas direcciones para la investigación. Se trata de las ULC MS Add. 3975, folios 1–22. Estos textos fueron guardados por Newton en una caja, junto a muchos otros, al dejar Cambridge, formaron parte de la Colección Portsmouth. En 1888 los manuscritos científicos fueron donados a la biblioteca de la Universidad de Cambridge. Es la primera vez que el lector de lengua castellana tiene acceso a esta traducción. Se han conservado las notas de sus editores J. E. McGuire y Martin Tamny.

Las investigaciones ópticas de Newton llamaron la atención de la Sociedad Real cuando fue exhibido ahí un telescopio construido por él. Poco después, el 11 de enero, Newton fue elegido miembro de la Sociedad Real, y correspondió enviando una explicación del descubrimiento que lo había llevado a su invento, el análisis de la dispersión y de la composición de la luz blanca. El texto que presentó está redactado a manera de carta y fue dirigido al secretario de la Sociedad Real, Henry Oldenburg; la carta fue

leída en la Sociedad Real el 6 de febrero de 1672, y fue publicada en *Philosophical Transactions* en el número 80, el 19 de febrero de 1672. Su "Nueva teoría de los colores" es ahora un ensayo clásico en el cual se fijan los cimientos experimentales de lo que Newton consideraba ya una teoría explicativa del color y se inscribe en la nueva práctica de hacer pública la ciencia. En este documento Newton detalla su famoso experimento con dos prismas, en el primero recoge un rayo de luz para descomponerlo en varios colores y mediante un segundo vuelve a reconfigurarlo, y demuestra con ello que la luz no es homogénea: "la luz es en sí una mezcla heterogénea de rayos diferentemente refrangibles". Su forma de proceder en sus investigaciones ópticas se aparta de lo que tradicionalmente se considera el "estilo newtoniano", caracterizado por un constante ir y venir de un modelo matemático a la realidad.[1] Su publicación generó una prolongada discusión con Hooke, Pardies, Linus, Huygens y Lucas. Posteriormente pasó a formar parte de la *Óptica*, libro I, parte I, publicada en 1704.

En "Hipótesis que explica las propiedades de la luz tratadas en varios de mis ensayos", su segundo escrito sobre la naturaleza de la luz, empiezan a delinearse los meandros del tránsito evolutivo de su teoría óptica; fue enviado a Henry Oldenburg en1675. En varios aspectos es poco novedoso, pues Newton había comenzado a delinearlos en 1672 como parte de su respuesta a Hooke, incluso parte del texto podemos ubicarlo en "De los colores". Newton muestra una filosofía mecánica ortodoxa. Propone su *hipótesis* así:

> […] si asumimos que los rayos de luz son cuerpos pequeños que se emiten para todos lados desde las sustancias brillantes, estos, cuando chocan con cualquier superficie reflectante o refractante, necesariamente excitan vibraciones en el éter, de la misma manera que hacen las rocas cuando se arrojan al agua. Y, si suponemos que estas vibraciones son de diferentes profundidades o grosores, de acuerdo con como son excitadas por los rayos corpusculares de diferentes tamaños y velocidades; qué utilidad tendrán para explicar la reflexión y la refracción; la producción de calor por los rayos del sol; la emisión de luz de sustancias ardiendo, o pudriéndose, u otras sustancias cuyas partes se agitan con vehemencia; los fenómenos de las placas delgadas transparentes, y de las burbujas, y de todos los cuer-

> pos naturales; la visión, y la diferencia de colores, así como su armonía y discordia, las dejaré a consideración de aquellos que piensan que vale la pena esforzarse en aplicar esta hipótesis a la solución de los fenómenos.[2]

Para que la hipótesis se complete "se ha de suponer que existe un medio etéreo de una constitución muy parecida a la del aire, pero mucho más raro, sutil, y más fuertemente elástico". De este modo relaciona las reflexiones y las refracciones con la existencia de un éter universal, más enrarecido en los poros de los cuerpos que en el espacio libre, cuya presión hacía que los corpúsculos de luz variaran de dirección. Un mecanismo de vibraciones en el éter explicaba los fenómenos periódicos de las películas delgadas.

La "Hipótesis de la luz" era algo más que una explicación de los fenómenos ópticos. La primera parte presentaba un sistema general de la naturaleza, basado en el mismo éter. Todos los fenómenos fundamentales incluidos en las *Quaestiones*, una década antes, aparecían de nuevo en la "Hipótesis", ya sea para ser explicados ahora por mecanismos etéreos o para ofrecer analogías ilustrativas. Por ejemplo, la presión del éter explicaba la cohesión de los cuerpos, y la tensión superior aclaraba un mecanismo etéreo. La "Hipótesis" no buscaba ser únicamente un sistema mecánico de la naturaleza, si bien mostraba una clara influencia de la filosofía mecánica, era un documento ambiguo en el cual aparecían vestigios de otras influencias que habían empezado a tomar cuerpo en la concepción de la naturaleza de Newton. Una de las características que lo distinguían era el papel prominente desempeñado por los fenómenos químicos y fisiológicos, ausentes en las *Quaestiones*, años antes.[3]Se incluye, además, la primera referencia al "principio gravitacional".

Tanto en la "Nueva teoría" como en la "Hipótesis" hemos conservado las notas de su editor I. Bernard Cohen, lo cual contribuye en gran medida a que tengamos una mejor comprensión de su contenido.

Los tres documentos iniciales son trabajos señeros importantes para documentar y explicarnos la evolución de ideas claves de un periodo de tiempo sustantivo en el desarrollo del atomismo como

una tradición ontológica y epistémica. Van acompañados de un conjunto de ensayos escritos por los principales estudiosos de la óptica newtoniana, los cuales hasta ahora no estaban a disposición del lector en lengua castellana. La presente reunión documental busca contribuir a una mejor comprensión de la obra de Newton, al mismo tiempo que intenta abonar al estudio de la historia y la filosofía de la ciencia.

La inclusión del texto de Thomas S. Kuhn le da al conjunto una relevancia singular por su autoridad como filósofo e historiador de la ciencia, sus trabajos han dejado una larga secuela de discusiones y controversias. En "Los documentos de óptica de Newton" destaca cómo la ciencia practicada por Newton y su generación se asienta en la "publicación técnica", a partir de entonces el nuevo modo de comunicarse entre los científicos, en donde el artículo –un reporte inmediato sobre la experimentación técnica o una interpretación preliminar de experimentos– comenzó a reemplazar al libro como la unidad comunicativa del científico.

La esencia de la nueva teoría de Newton, asegura Kuhn, residía en probar que "La luz del sol era una mezcla de todos los colores del arco iris; cada uno de los rayos de colores incidentes obedecía las leyes de la óptica; pero cada uno se refractaba a través de un ángulo diferente en su pasaje a través del prisma". Nos muestra también el papel ambivalente que Newton le atribuye a las hipótesis, "pues en 1672 negó la utilidad de las hipótesis cuando al presentar una teoría que él creía se podía hacer independientemente de ellas, pero al tratar con los colores de películas delgadas en las importantes cartas de 1675/6 empleó hipótesis explicitas, presumiblemente porque el nuevo tema de esas cartas no podía elaborarse de otra forma". Una buena parte de la información más interesante está contenida en las cartas de Newton a sus críticos, en donde al decir de Kuhn "de todos sus escritos ópticos, estas cartas reflejan mejor los procedimientos de Newton en acción". En este texto también se han conservado las notas de I. Bernard Cohen.

Isaac Newton: una vida es uno de los libros más importantes sobre Newton, dirigidos hacia un público amplio con un sonado éxito editorial sin demérito a la profundidad y al rigor investigativo, su autor Richard S. Westfall ha hecho una contribución significativa para el mayor conocimiento y mejor comprensión de la obra magna de Newton. "El desarrollo de la teoría del color de Newton" es un texto valioso en al menos tres sentidos: primero, porque nos muestra el proceso evolutivo de una teoría a partir de los primeros documentos newtonianos; segundo, por hacer una exposición explicativa del desarrollo de la teoría del color a partir de la tradición mecanicista, Westfall expresa cómo "la teoría de Newton fue expuesta para refutar las que le eran familiares, las teorías de Descartes y Hooke", pues encuentra en distintos pasajes evidencias reveladores para decir: "ambos nombres estaban presentes en la mente de Newton mientras escribía", y valiéndose, además, en su empeño refutador de Boyle en más de una ocasión; tercero, al evidenciar el genio original de Newton para superar las dificultades planteadas por sus adversarios apoyándose en nuevos ideales y prácticas de la ciencia, entre ellas la aplicación seria de los principios de la mecánica en una escala microscópica.

La misma o quizá hasta mayor importancia le podemos atribuir a Alan E. Shapiro, quien dedicó la mayor parte de su vida al estudio de las investigaciones ópticas de Newton, reuniendo documentos, traduciendo otros, podemos decir que se trata del más grande estudioso de Newton, con un interés definido en los trabajos sobre óptica. "La estructura evolutiva de la teoría del color y la luz blanca de Newton" es un ensayo centrado en la exposición de los cambios importantes realizados por Newton en su teoría del color tanto en su contenido como en su estructura en los treinta años, a partir de sus primeros apuntes registrados en *Optical Lectures* hasta la *Óptica*. Una buena parte de su argumentación está sustentada en su análisis de las *Lectures*, lecciones presentadas en la Universidad de Cambridge entre 1670 y 1672. Shapiro las considera relevantes, pues fueron "su primer intento

a gran escala de formular su teoría y también porque fueron presentadas antes de que hiciera pública su teoría, al menos más allá de sus estudiantes en Cambridge".

Shapiro nos muestra en detalle cinco momentos en los cuales Newton realizó distintas reformulaciones de su teoría. Uno de esos momentos estelares se da en la respuesta a la crítica certera de Christiaan Huygens, ante la cual se vio forzado a "modificar su quinta proposición, que la blancura es compuesta de todos los colores, a la afirmación más débil de que la luz blanca del sol está compuesta de todos los colores, incluso concedería que el blanco podría estar compuesto de muchos menos colores que un número infinito de colores, quizá tan solo tres, y por consecuencia que habías dos tipos de blancos". La importancia de esta concesión, piensa Shapiro, debilitó seriamente su teoría al limitar su alcance universal, de toda la luz blanca a la luz blanca del sol, forzando a Newton "a introducir una vergonzante dicotomía entre dos tipos de luz blanca, una de las cuales era 'antinatural'"; si bien esto solo fue evidente un siglo después.

Los problemas de Newton para mantener de pie su teoría óptica fueron más de los que uno podría imaginar. Otro de ellos aparece en uno de los supuestos claves de la teoría, su corpuscularismo. El estatus que guarda en el marco de su teoría es debatible, al cuestionarse si es demostrable o no ese carácter corpuscular de la luz. En "La óptica de Newton y el atomismo" Shapiro, al examinar qué papel tuvo el atomismo en la formulación de su teoría, nos dice que desde "sus primeras notas Newton utilizó las colisiones entre los corpúsculos de la luz y los cuerpos para explicar la reflexión y la refracción. Sin embargo, pronto reconoció que cuando se asume que la materia tiene una estructura atómica, este modelo colapsa". Esto pudo haberlo llevado a decir en una nota marginal que él proponía únicamente una analogía y no un argumento sobre la naturaleza corpuscular de la luz. A pesar de lo anterior estimó el tamaño de los corpúsculos que componen varios cuerpos de su color, además asumió que los corpúsculos son de la misma densidad óptica que el agua o el vidrio. Incluso

anticipó ver los corpúsculos de los cuerpos, pensaba que "los microscopios podrían mejorarse hasta el descubrimiento de los corpúsculos de los cuerpos de que dependen los colores".

Que Newton no considerara a los átomos como una hipótesis se devela por el prefacio que escribió para *Óptica*, no publicado, en el que habla de cuatro principios, el cuarto un "principio es que todos los cuerpos sensibles son agregados de partículas junto con muchos intersticios o poros entre ellas". Esto lleva a Shapiro a sostener que la teoría corpuscular de la materia no fue para Newton una hipótesis sino un principio establecido con tanta certeza como la existencia de Dios o la teoría de la gravitación, y que haber considerado la cualidad como una hipótesis o una asunción hubiese sido violar uno de sus principios metodológicos fundamentales. Sin embargo, más allá de la simpatía de Shapiro por Newton, esto es algo que todavía forma parte de las controversias actuales.

En cuanto a los textos de Hideto Nakajima y August Ziggelaar, son de los investigadores más recientes que hemos decidido sumar por la profundidad y consistencia de sus trabajos, con una visión, además, comparativa de conjunto, lo cual les permite una valoración más justa de la aportación newtoniana en relación con otras teorías.

En "Dos tipos de teoría de modificación de la luz: algunas nuevas observaciones sobre la controversia Newton-Hooke de 1672 con respecto de la naturaleza de la luz", Nakajima nos expone la coexistencia entre dos distintas teorías de la modificación con un nuevo marco interpretativo y busca describir el papel de cada una de ellas, así como la contribución de la teoría de la modificación de Aristóteles en la creación de la teoría óptica de Newton.

En su texto Nakajima cuestiona las interpretaciones de Westfall en el documento que aquí se incluye, y la de Sabra al respecto de las dos teorías en pugna. Comenta la adopción de Newton de la teoría de la modificación de Aristóteles al inicio de sus investigaciones y su abandono gradual. Al mismo tiempo critica a Hooke por la teoría de la modificación de Descartes-

Hooke. Defiende el papel positivo de la teoría de Aristóteles en Newton, pues la descripción de Newton preservó el concepto de los colores de Aristóteles, según la cual la luz roja es la luz más fuerte porque contiene la menor oscuridad y la luz azul es la más débil porque contiene la mayor oscuridad. Newton asociaba el rojo con los corpúsculos más rápidos y el azul con los más lentos. El rojo era la impresión hecha por los glóbulos de luz más fuerte y el azul era la impresión hecha por los más débiles. En esto coincidían Aristóteles y Newton. Al principio Newton asoció los colores con velocidades de los corpúsculos de luz, pero cambió su opinión después en *Quaestiones* y vinculó los colores con las masas de los glóbulos.

Uno de los aspectos más controversiales en torno a la obra de Newton reside en la discusión con Huygens y otros adversarios sobre la naturaleza rectilínea u ondulatoria de la luz. En su publicación en 1687 de los *Principios matemáticos de la ciencia natural* Newton intentó derivar del cuerpo de su teoría general propuesta la ley de los senos de refracción y la ley de reflexión, sin dejar de reconocer a Snell, Descartes y Grimaldi. Con esto buscó darle sustento a sus investigaciones ópticas en el marco de su teoría matemática, que incluía también a la gravitación. August Ziggelaar nos muestra en el documento final de la presente antología, "El debate inicial con respecto a la teoría ondulatoria", un balance pormenorizado de la discusión sobre este tópico.

Ziggelaar nos expone cómo Newton, en la sección ocho del libro segundo de los *Principio*s, tenía la clara intención de refutar las teorías ondulatorias de Descartes y Hooke, en la "que niega cualquier validez de la analogía entre la propagación de las olas en el agua y las olas de sonido, y las vibraciones de una partícula en un fluido tenue". Además se apoya en otros documentos, como una de las cartas dirigidas a Oldenburg el 11 de junio de 1672 y otra del 7 de diciembre de 1675. Huygens, después de estudiar los *Principios* de Newton, publicó en 1690 su *Tratado sobre la luz*, en él enfrentó los argumentos de Newton contra las teorías ondulatorias; tuvo éxito utilizando su principio de óndulas

secundarias, "aunque falló en considerar el hecho de que la luz puede, hasta cierto punto, desviarse alrededor de un obstáculo". Ziggelaar rastrea en *Óptica*, sobre todo en las *Cuestiones*, aquellas referencias en las que Newton pareciera atacar las explicaciones de Huygens del fenómeno de la reflexión; asimismo da cuenta de la admisión de Huygens de su incapacidad para explicar la polarización por medio de su teoría ondulatoria. Extiende su análisis hasta las aportaciones de Leonhard Euler, Thomas Young, Étienne Louis Mlus y Augustin-Jean Fresnel, para mostrar que fue este último quien llevó a su culminación la teoría ondulatoria de la luz "sobre la base de su hipótesis de las ondas transversales en el éter elástico", con lo cual nos muestra un balance a favor de Newton, dadas sus circunstancias y los argumentos de sus oponentes.

En síntesis, en la presente antología se ofrece un fragmento de la tradición atomística inaugurada por Leucipo, Demócrito y Epicuro, continuada y preservada poco después por Lucrecio; retomada luego de Epicuro por Gassendi, continuada por Descartes y fortalecida por Newton. Las tradiciones mantienen ciclos en los cuales desaparecen y aparecen con nuevos y viejos ideales epistémicos, pero mantienen su raíz ontológica, en este caso los corpúsculos o las partículas de la materia, las cuales son utilizadas por Newton para explicar el comportamiento de la luz, teniendo como base una fuerte carga experimental para legitimar sus tesis. La etapa newtoniana de esta tradición sentó un precedente que se mantiene hasta nuestros días.

El origen de esta antología se remonta a un trabajo iniciado con el objetivo de obtener el grado en maestría en filosofía de la cultura en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, con un ensayo que lleva por título *El pluralismo metodológico en la teoría óptica de Newton*; a lo largo de este proceso se ubicaron diversos documentos que requerían del apoyo de un traductor que me hicieran más fácil la tarea, fue en este momento cuando apareció Iván Rodríguez, quien me apoyó de una manera tan comprometida, la verdad sea dicha, pocas veces vista, en el trabajo

de traducir la totalidad de los textos que aquí se incluyen. Al término del trabajo nos dimos cuenta de que teníamos en nuestras manos un manojo de documentos que merecían ser publicados.

La obtención de los documentos se dio en diferentes instancias como la Biblioteca Central de la Universidad Autónoma de Chihuahua, la Biblioteca Pública Ector County de Odessa, Texas; la Biblioteca de la Universidad de Texas en El Paso, la Biblioteca Eduardo García Maynez del Instituto de Investigaciones Filosófica de la Universidad Nacional Autónoma de México y también gracias al apoyo de avezados libreros. Hoy esos documentos son asequibles en la página electrónica *The Newton Project*.

Mi más grande agradecimiento va para Iván Rodríguez, porque sin su inmenso esfuerzo y gran sentido del trabajo colaborativo esta obra sería francamente inconcebible; a Luis David Hernández por su lectura y correcciones, así como a Jorge Villalobos por su cuidadoso trabajo de edición.

Esta obra ha esperado de manera paciente algunos años su publicación hasta obtener los derechos correspondientes por la traducción, lo cual fue posible gracias al apoyo del director de la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad Autónoma de Chihuahua, el maestro Luis Alberto Fierro Ramírez, a quien le expresamos nuestro más profundo y sincero reconocimiento.

Esperamos en un futuro próximo poder realizar la publicación de un segundo volumen.

H. R.
Chihuahua, 2014.

NOTAS

1 Véase I. Bernard Cohen: *La revolución newtoniana y la transformación de las ideas científicas*, pp. 154-161. Asimismo la "Introducción" de Carlos Solís a la traducción castellana de la *Óptica* de Newton, p. XXI.

2 Véase "Una hipótesis que explica las propiedades de la luz, discutida en varios de mis ensayos", p. 51 (cursivas en el original).

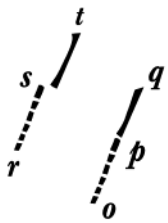
3 Véase Richard S. Westfall: *Isaac Newton: una vida*, pp. 129-130.

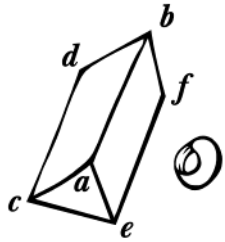
De "De los colores"[1]

Appendix. ULC. Add. 3975, Folios 1-22 (Of Colours), pp. 466-489, in J. E. McGuire, Martin Tamny, *Certain Philosophical Questions. Newton's Trinity Notebook*, (1983). © **Cambridge University Press 1983, translated with permission**.

Experimentos con el prisma

En una pieza de papel negro dibujé una línea *opq*, de la que la mitad *op* era un buen azul, la otra *pq* un buen rojo profundo (elegido por exploración de colores). Y al mirarlo a través del prisma *adf* apareció dividido en dos entre los colores, así como en *rst* la parte azul *rs* estaba más cerca del vértice *ab* del prisma que las partes rojas *st*. De manera que los rayos azules sufren una refracción mayor que los rojos. Nota: le llamo rayos azules o rojos, etcétera, a los que forman el espectro de esos colores.

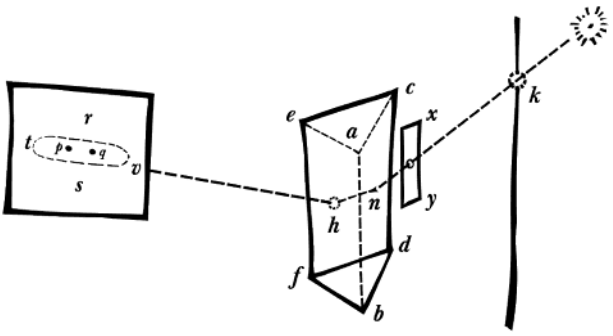




El mismo experimento se puede intentar con un haz de dos colores sostenido contra la oscuridad.

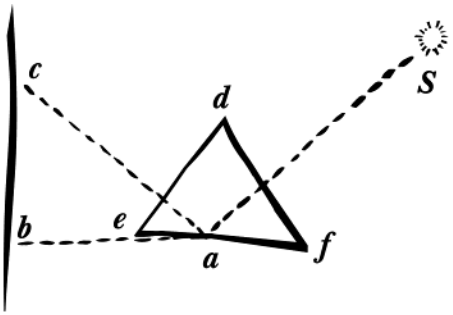
Al tomar un prisma (cuyo ángulo *fbd* era de aproximadamente 60°) en una habitación oscura en la que el sol brillaba solo por un agujero pequeño *k*, y al colocarlo cerca del agujero *k* de tal manera que los rayos, siendo refractados por igual en (*n* y *h*) en su entrar y salir de él, proyectan colores *rstv* en la pared opuesta. Los colores debían haber ocurrido en un círculo redondo si todos los rayos se refractaran por igual, pero su forma era oblonga terminada en sus lados *r* y *s* con líneas rectas; su anchura *rs* siendo $2\ ^{1}/_{3}$ pulgadas, su longitud aproximadamente 7 u ocho pulgadas, y los centros del rojo y del azul, (*q* y *p*) con una distancia de aproximadamente $2\ ^{3}/_{4}$ o 3 pulgadas. La distancia de la pared *trsv* del prisma era de 260 pulgadas.

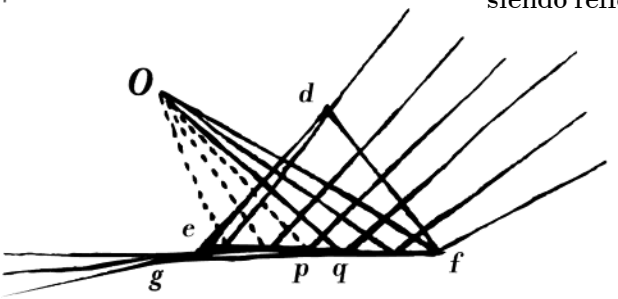
Al colocar el prisma a la mitad entre el agujero *k* y la pared opuesta, en la misma postura, y al colocar un tablero *xy* entre el agujero *k* y el prisma cerca del prisma, en cuyo tablero había un agujero pequeño del mismo tamaño que el agujero *k* (a saber: $^{1}/_{8}$ de pulgada de diámetro), de manera que los rayos que pasen a través de ambos agujeros al prisma puedan estar casi paralelos (faltando menos de 7 minutos, mientras que en el experimento anterior algunos rayos tenían una inclinación de 31 minutos). Entonces la longitud y ancho de los colores en las paredes era en todas formas menos de la mitad que en el anterior por aproximadamente 2 pulgadas, a saber *rs* = $^{3}/_{8}$ de pulgada, *tv* = 2 $^{3}/_{4}$ pulgadas y *pq* = 1 $^{1}/_{4}$ pulgada. De manera que se puede estimar que los rayos rojos y azules que eran paralelos antes de la refracción están generalmente inclinados uno al otro después de la refracción (algunos más o algunos menos de) 34 minutos. Y aun así algunos de ellos están inclinados más de un grado, en este caso. Y por tanto si sus senos de incidencia (del cristal hacia el aire) son los mismos, sus senos de refracción en general estarán en proporción de 285 a 286 y para los rayos rojos y azules más extremos serán de 130 a 131+, ya que por el experimento si su ángulo de incidencia del vidrio al aire es 30°, siendo la refracción angular de los rayos 48° 35'; la refracción angular de los rayos azules será de 48°, 52', en general: pero si los rayos son extremadamente rojos y azules el ángulo de refracción de los rayos azules puede ser mayor a 49°, 5'.



* * *

Si el sol *S* brilla sobre el prisma *def*, siendo algunos de sus rayos transmitidos por la base *ef* formarán colores en la pared *cb* en *b*, y otros serán refractados a la pared en *c* formando solo un blanco sin colores; ahora, si el prisma se inclina de tal manera que los rayos *ab* sean refractados de manera más y más oblicua, el color azul al fin se desvanecerá de *b*; de manera que siendo solo el rojo refractado a *b*, el azul se reflectará a *c* y hará que el color blanco ahí aparezca un poco azulado. Pero si el prisma se inclina un poco más, el color rojo *b* se desvanecerá también y siendo reflejado a *c* hará que el color azul se torne blanco de nuevo.





Si en el aire abierto se mira a la imagen del cielo reflejada de las bases del prisma *ef*, al mantener el ojo *O* casi perpendicular a la base se verá una parte del cielo *ep* (como si estuviera cubierto por una cortina delgada) aparecer más oscura que la otra *qf* [ya que todos los rayos dentro pueden venir hacia el ojo desde *qf* caen oblicuamente en la base, de manera que son reflejados al ojo; mientras que aquellos que pueden venir al ojo desde *ep* son tan directos a la base que la mayoría de ellos se transmiten a *g*]: y la partición de esas dos partes del cielo, *pq*, aparece azul [ya que los rayos que pueden llegar al ojo desde *pq* están tan inclinados a la base que todos los rayos azules se reflejan al ojo, mientras que la mayoría de los rayos rojos son transmitidos hasta *g*, como en el experimento 22].

Al atar dos prismas juntos base a base *def y bef*: los sostuve así en los rayos del sol, transmitidos por un agujero a una habitación oscura, de manera que cayeran directamente sobre la base *ef* (en la figura 1), donde la mayoría de ellos fueron transmitidos a *B* en el papel *CB*; aunque algunos de ellos fueron reflejados a *c* por la película de aire *ef* entre los prismas. Pero tanto *C* como *B* eran blancos. Entonces incliné la base (*ef*) de los prismas más y más hacia los rayos hasta que *B* cambió de blanco a rojo y el blanco en *C* se tornó azulado, y al inclinar el prisma un poco más el rojo en *B* se desvaneció, y el color azulado en *c* se hizo blanco de nuevo, como en el experimento 22.

Si sostenía los prismas mencionados en el aire abierto como en el experimento 23, manteniendo mi ojo en *O* (en la segunda figura) para ver el cielo reflejado, los fenómenos fueron los mismos que en ese experimento 23; *ep* aparecía más oscuro que *qf*, y *pq* era azul. Pero si mantenía mi ojo en *N* para ver el cielo por la base de los prismas *ef* (o más bien a través de la placa de aire entre esas dos bases), aparecían los fenómenos contrarios pero mucho más tenues; siendo *ep* muy ligero, *qf* muy oscuro y *pq* muy rojo [la razón se explicó en el experimento 23].

Nótese que el 22 y el 24 (y todos los experimentos parecidos que requerían que los rayos que vienen de un cuerpo luminoso estén todos completamente o casi paralelos) serían más notables si el diámetro del sol fuera menor, y por tanto para tales experimentos sus rayos pueden ser separados a través de dos pequeños agujeros separados a una buena distancia, como se hizo en el experimento 8.

También los experimentos 23 y 25 (la mayoría de otros parecidos en que los rayos pasan inmediatamente del prisma al ojo) serían más notables si la pupila fuera menor de lo que es, y por tanto sería conveniente mirar a través de un pequeño agujero en el prisma.

* * *

Si tres o más prismas, *A*, *B*, *C*, se sostienen al sol de manera que el color rojo del prisma *B* caiga sobre el color verde o amarillo del prisma *A* y el color rojo del prisma *C* cae en el color verde o amarillo del prisma *B*; los colores mencionados caen sobre el papel *DE* en *P*, *Q*, *R*, *S*. Aparecerá un color rojo en *P* y uno azul en *S*, pero entre *Q* y *R* donde se mezclan los rojos, amarillos, verdes, azules y violados de los diferentes prismas aparece un blanco.

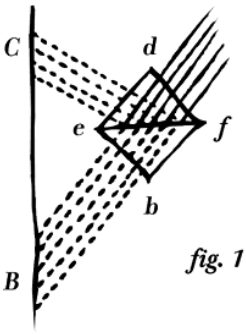


fig. 1

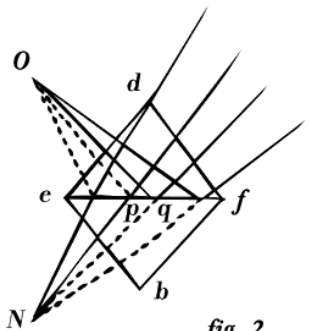
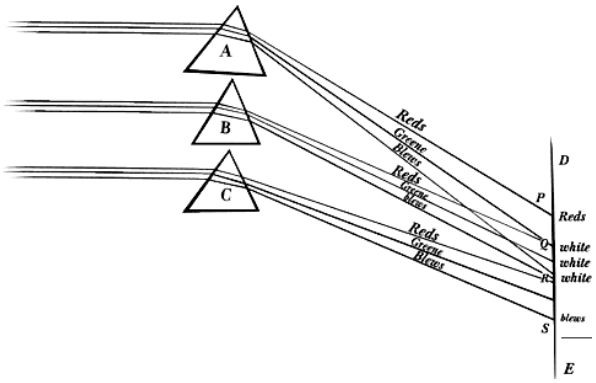
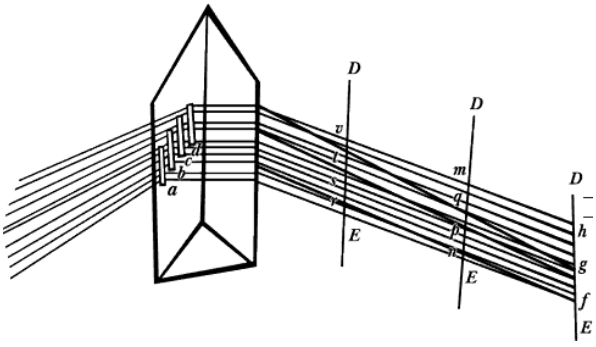


fig. 2





O si se limpia un pedazo de papel de un lado del prisma con varias ranuras *a*, *b*, *c*, *d*, paralelas a los bordes del prisma, de manera que la luz que pase a través de esas ranuras haga colores en el papel *DE*; si el pa-

pel mencionado se mantiene más cerca del prisma aparecerán para cada ranura *a*, *b*, *c*, *d*, una línea coloreada *r*, *s*, *t*, *v*. Al mantener el papel más lejos hasta que las líneas coloreadas se mezclen, aparecerá un blanco entre *p* y *q* donde esos colores se mezclan; en *m* aparecen rojos y en *n* azules. Pero si el papel se sostiene aun más lejos del color blanco (*pq*) aparecerá más y más estrecho hasta desvanecerse, y entonces *gh* de un lado aparece rojo y *gf* del otro lado es azul.

NOTAS

[1] J. E. McGuire and Martin Tamny, *Certain Philosophical Questions: Newton's Trinity Notebook*, pp. 466-80. El ensayo sin fecha "Of Colours", redactado probablemente a principios de 1666, contiene la primera elaboración fundamentada de la teoría del color de Newton en desarrollo.

Nueva teoría acerca de la luz y los colores

Pages 47-59 from Isaac Newton, Edited by H. W. Turnball, *The Correspondence of Isaac Newton*, Vol. 1: 1661-1675, (1959). ISBN 058120, **© The Royal Society of London 1959, published by Cambridge University Press** 1983.

Newton a Oldenburg

6 Febrero 1671/2

De *Philosophical Transactions*, 6 (1671/2), 3075-87, con enmiendas.[1]

Trin: College Cambridge Feb: 6. 1671/2

Señor,

Para llevar a cabo la última promesa que le hice, debo informarle sin mayor ceremonia que al inicio del año 1666 (en el cual me dediqué a pulir cristales ópticos de formas diferentes a la *esférica*) fabriqué un prisma triangular para intentar con él los celebrados *fenómenos* de los *colores*.[2] Y para ello habiendo oscurecido mi habitación y hecho un pequeño orificio en mi ventana para permitir la entrada de una cantidad conveniente de luz solar, coloqué mi prisma a su entrada, para que pudiera ser refractada a la pared opuesta. En principio fue una distracción el observar los intensos y vívidos colores que se produjeron, pero después de un tiempo me dediqué a observar más detenidamente y me sorprendí de verlos en forma *oblonga*; los cuales, de acuerdo con las leyes de refracción recibidas,[3] yo esperaba que debían ser *circulares*.

Los colores terminaban a los lados con líneas rectas, pero en los extremos la disminución de luz era tan gradual que era difícil determinar con justicia cuál era su figura; aunque parecían *semicirculares*.

Al comparar la longitud de este *espectro* de colores con su anchura encontré que era cinco veces más grande, una desproporción tan extravagante que excitó una curiosidad más que ordinaria para examinar de dónde podría proceder. Difícilmente podía pensar que los diversos *grosores* del cristal, o la terminación con sombra u oscuridad, podría tener alguna influencia en la luz para tener tal efecto; así que pensé que no estaría mal examinar

primero esas circunstancias, y así intente saber qué podría ocurrir al transmitir luz a través de diversas partes del cristal de diversos grosores, o a través de orificios en la pared de diversos tamaños, o al retirar el prisma para que la luz pudiera pasar a través de él y pudiera ser refractada antes que la terminara el orificio: pero encontré que ninguna de esas circunstancias tenía consecuencia. El comportamiento de los colores era en todos los casos el mismo.

Entonces sospeché si por alguna *desigualdad* en el vidrio u otra irregularidad contingente, esos colores podrían así dilatarse. Y para probar esto tomé otro prisma como el primero y lo coloqué de tal forma que la luz, pasando a través de ambos, pudiera ser refractada en direcciones contrarias, y así por el segundo prisma volvió a su curso del cual el primero había desviado; ya que por estos medios, pensé, los efectos *regulares* del primer prisma serían destruidos por el segundo prisma, pero los efectos *irregulares* serían aumentados, por la multiplicidad de las refracciones. Lo que pasó fue que la luz, la cual el primer prisma había difundido en una forma *oblonga*, fue reducida por el segundo en una forma *orbicular* con mucha más regularidad, como cuando no pasó a través de él. Así que, cualquiera que fuera el motivo de esa longitud, no era por ninguna irregularidad contingente.

Entonces procedí a examinar de manera más crítica qué podría efectuarse por la diferencia de la incidencia de los rayos provenientes de diversas partes del sol, y para ese fin medí las diferentes líneas y ángulos de la imagen. Su distancia desde el orificio o prisma era de 22 pies, su longitud máxima era de 13 $^{1}/_{4}$ pulgadas, su anchura de 2 $^{5}/_{8}$ pulgadas, el diámetro del orificio era de $^{1}/_{4}$ de pulgada; el ángulo que los rayos hacían con las líneas tendiendo hacia la parte media de la imagen a que habrían procedido sin la refracción era de 44 grados 56'; y el ángulo vertical del prisma, 63 grados 12'. También las refracciones en ambos lados del prisma, esto es, de los rayos incidentes y emergentes, eran, dentro de lo que podía observar, iguales, y en consecuencia[4] de aproximadamente 54 grados 4'. Y los rayos caían perpendicularmente sobre la pared.[5] Ahora, restando el diámetro del agujero de la longitud

y anchura de la imagen, quedan 13 pulgadas de la longitud y $2\ ^{3}/_{8}$ del ancho comprendido por esos rayos que pasaron por el centro del orificio mencionado, y en consecuencia el ángulo en el orificio que esa anchura subtendía era de 31', correspondiente al diámetro del sol; pero el ángulo que la longitud subtendía era más de cinco de esos diámetros, de 2 grados 49'.

Habiendo hecho estas observaciones, primero calculé de ellas el poder refractivo de ese vidrio, y lo encontré al medir la *proporción* de los senos 20 a 31.[6] Y entonces, por esa *proporción*, calculé las refracciones de dos rayos fluyendo de partes opuestas del *disco* del sol para que difirieran en 31' en su oblicuidad de incidencia, y encontré que los rayos emergentes debían haber comprendido un ángulo de aproximadamente 31', como había sido antes de que fueran incidentes.

Pero por causa de que este cálculo fue fundado en la hipótesis de la proporcionalidad de los *senos* de incidencia y refracción, que a pesar de mi propia experiencia y la de otros[7] no podía imaginar que fuera tan errónea como para hacer el ángulo de 31', que en realidad era de 2 grados 49', aun así mi curiosidad me llevó a tomar mi prisma de nuevo. Y habiéndolo colocado en la ventana como antes, observé que al girarlo sobre su *eje* de un lado a otro para variar su oblicuidad a la luz, más que por un ángulo de 4 o 5 grados, los colores no se trasladaron de manera sensible de su lugar en la pared, y en consecuencia por esa variación de incidencia, la cantidad de refracción no fue variada en forma sensible. Por tanto por este experimento, así como por el cálculo previo, fue evidente que la diferencia de la incidencia de los rayos, fluyendo de diversas partes del sol, no podía hacerlos divergir después de la intersección a un ángulo sensiblemente mayor que aquel al que convergieron antes, el cual, siendo de alrededor de 31 o 32 minutos a lo máximo, dejaba todavía por encontrar alguna otra causa de donde podían ser 2 grados 49'.

Entonces comencé a sospechar si los rayos, después de su trayecto por el prisma, no se movían en líneas curvas, y de acuerdo a su curvatura mayor o menor, tendían a diversas partes

de la pared. Y mi sospecha se incrementó cuando recordé que con frecuencia había visto una bola de tenis ser golpeada con una raqueta oblicua y describir tal curva. Ya que un movimiento circular y progresivo comunicado a una pelota por un golpe, con sus partes en ese lado, donde conspiran los movimientos, debe presionar y vencer el aire contiguo de manera más violenta que la otra, y ahí motivar una resistencia y reacción al aire proporcionalmente más grande.[8] Y por la misma razón, si los rayos de luz posiblemente fueran cuerpos globulares, y por su pasaje oblicuo de un medio a otro adquieren un movimiento circular, deben sentir la mayor resistencia del éter ambiental en ese lado donde los movimientos conspiran y de ahí doblar de manera continua hacia el otro.[9] Pero sin importar esta plausible base de sospecha, cuando llegué a examinarla, observé que no había tal curvatura en el espectro. Y además (lo cual era suficiente para mi propósito) observé que la diferencia entre la longitud de la imagen y el diámetro del orificio a través de la cual la luz era transmitida era proporcional a su distancia.

El derrumbe gradual de esas sospechas a la larga me llevó al *Experimentum Crucis*,[10] que era este: tomé dos tableros y coloqué uno de ellos cerca detrás del prisma en la ventana para que la luz pudiera pasar a través de un pequeño agujero hecho en el tablero para ese propósito y cayera en el otro tablero, el cual había colocado a 12 pies de distancia aproximadamente, habiendo hecho primero un pequeño agujero también para que alguna de la luz incidente pasara a través de él. Entonces coloqué otro prisma detrás del segundo tablero para que la luz que viaja a través de ambos tableros pudiera pasar por él y ser refractada antes de que llegara a la pared. Hecho esto, tomé el primer prisma en mi mano y lo giré de un lado a otro sobre su *eje* en forma lenta, de forma que las diversas partes de la imagen proyectadas en el segundo tablero pasaran a través del agujero en él de manera sucesiva, para que yo pudiera observar hacia qué lugares de la pared los refractaría el segundo prisma. Y vi, por la variación de esos lugares, que la luz, tendiendo hacia esa terminación de la

imagen hacia la cual se hizo la refracción del primer prisma, en el segundo prisma sufrió una refracción mucho más grande que la luz tendiendo hacia la otra terminación. Y entonces se detectó que la causa verdadera[11] de la longitud de la imagen no era otra más que la *luz* consiste de *rayos diferentemente refrangibles*, los cuales, sin ningún respecto a la diferencia en su incidencia, eran, de acuerdo a sus grados de refrangibilidad, transmitidos hacia diversas partes de la pared.

Cuando comprendí esto abandoné mis trabajos con cristal, ya que vi que la perfección de los telescopios estaba hasta ahora limitada, no tanto por falta de cristales de figura fiel a las prescripciones de los autores ópticos[12] (que todos los hombres se han imaginado hasta ahora), sino porque la luz es en sí una *mezcla heterogénea de rayos diferentemente refrangibles*. Así que, aunque un cristal tuviera una forma tan exacta como para recolectar cualquier tipo de rayos en un solo punto, no podría recolectar aquellos que, teniendo también en el mismo punto la misma incidencia en el mismo medio, son aptos a sufrir una diferente refracción. No solo esto, también me admiré de que, viendo que la diferencia de refrangibilidad era tan grande como la encontré, los telescopios llegaran a la perfección en que se encuentran ahora. Ya que, al medir las refracciones en uno de mis prismas encontré que, al suponer el *seno* de incidencia común hacia uno de sus planos era 44 partes, el seno de refracción de los rayos más lejanos en el extremo rojo de los colores hecho del vidrio hacia el aire sería de 68 partes, y el *seno* de refracción de los rayos más lejanos en el otro extremo, 69 partes: así que la diferencia es de aproximadamente la 24a. o 25a. parte de la refracción total.[13] Y en consecuencia, el cristal de objeto de cualquier telescopio no puede recolectar todos los rayos que vienen de un punto de un objeto como para hacerlos converger en su *foco* en una extensión menor que en un espacio circular, cuyo diámetro es la 50a. parte del diámetro de su apertura; lo que es una irregularidad, algunos cientos de veces mayor, de la que causaría una *lente* de forma circular de una sección tan pequeña como son los cristales de

objetivo de los telescopios largos, por no ser adecuada su figura, si la luz fuera *uniforme*.

Esto me hizo tomar a consideración las *reflexiones*, y al encontrarlas regulares, de manera que el ángulo de reflexión de todos los tipos de rayos fuera igual a su ángulo de incidencia, comprendí que por medio de ellas los instrumentos ópticos podrían llevarse a cualquier grado de perfección imaginable, si se pudiera encontrar una sustancia reflectante que se pudiera pulir de manera tan fina como un vidrio y que *reflejara* tanta luz como el cristal *transmite*, y también se agregara el arte de comunicar la luz a una figura *parabólica*. Pero esas parecían dificultades muy grandes, y yo las creí casi insuperables cuando consideré además que cualquier irregularidad en una superficie reflejante hace a los rayos desviarse 5 o 6 veces más fuera de su curso debido que las irregularidades similares de una superficie refractante:[14] así que aquí sería requisito una curiosidad mucho más grande que en el modelado de cristales para refracción.

Entre estos pensamientos me vi forzado a salir de *Cambridge* por la plaga interventora,[15] y pasaron más de dos años antes de que yo procediera.[16] Pero entonces había pensado en una mejor manera para pulir, apropiada para el metal por el que, como imaginaba, la figura también se corregiría a lo último; comencé a probar qué podría hacerse con este y gradualmente perfeccioné un instrumento[17] (en sus partes esenciales similar al que envié a Londres) por el que pude divisar las cuatro lunas de Júpiter y mostrarlas varias veces a dos conocidos. También pude observar la fase de *Venus* similar a la Luna, pero no muy claramente, no sin ajustar el instrumento de forma particular.

Desde entonces hasta este último otoño fui interrumpido, cuando hice el último experimento. Y ya que fue bastante mejor que el primero (especialmente para objetos diurnos), no dudo que serán llevados a una perfección mucho mayor por quienes, como me informa, se encargan de eso en *Londres*.[18]

A veces he pensado en hacer un microscopio, el cual en una manera similar tendría, en vez de un cristal de objetivo, una

pieza reflectante de metal. Espero que también tomen esto en consideración. Ya que esos instrumentos parecen tan capaces de mejora como los *telescopios*, y tal vez más, ya que no hay otro requisito más que una pieza de metal reflectante, como puede usted apreciar en el diagrama anexo, donde *A B* representa el metal de objetiivo, *C D* el cristal ocular, *F* su foco común, y *O* el otro foco del metal, en que se coloca el objeto.

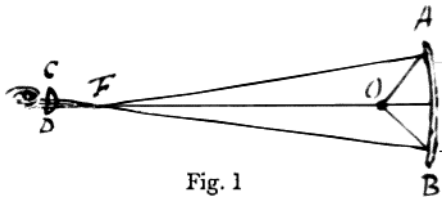


Fig. 1

Pero volviendo al tema, le decía que la luz no es similar u homogénea, sino que consiste en rayos *disformes*, algunos de los cuales son más refrangibles que otros: así aquellos que sean incidentes en forma similar en el mismo medio, algunos serán más refractados que otros, y no por ninguna virtud del cristal, u otra causa externa, sino por una predisposición, que consiste en que cada rayo particular tiene que sufrir un grado particular de refracción.

Ahora procederé a enterarlo de otra disformidad más notable en sus rayos, en que se contiene el *origen de los colores*.[19] Un naturalista escasamente podría esperar[20] ver su arte volverse matemático, y yo me atrevo a afirmar que hay tanta certeza en él como en cualquier parte de la óptica. Porque lo que diré respecto a ellos no es una hipótesis sino la más rígida consecuencia, no conjeturada solo de inferir que así es porque no es de otra forma o porque satisface todos los fenómenos (el tema universal de los filósofos), sino que es evidenciado por la mediación de experimentos que concluyen de manera directa y que no dejan lugar a duda. Continuar con la narración histórica de esos experimentos haría un discurso muy tedioso y confuso, por tanto mejor explicaré la *doctrina* primero y después, para su examen, le daré un ejemplo de dos de los *experimentos* como muestra del resto.

Encontrará la doctrina comprendida e ilustrada en las siguientes proposiciones.

1. Ya que los rayos de luz difieren en su grado de refrangibilidad, también difieren en su disposición a exhibir este o aquel color en particular. Los colores no son *cualidades de la luz* derivadas de sus refracciones, o reflexiones de cuerpos naturales (como se cree generalmente) sino que son *propiedades originales* e *innatas*, que en diferentes rayos son distintas. Algunos rayos están dispuestos a exhibir un color rojo y ningún otro; algunos amarillo y ningún otro, algunos verde y ningún otro, y así el resto. No existen tampoco rayos adecuados y particulares a los colores más eminentes, sino incluso a todas sus gradaciones intermedias.

2. Al mismo grado de refrangibilidad siempre pertenece al mismo color, y al mismo color siempre pertenece el mismo grado de refrangibilidad. Los rayos *menos refrangibles* están todos dispuestos a exhibir un color *rojo*, y, por lo contrario, aquellos rayos que están dispuestos a exhibir un color *rojo* son los menos refrangibles de todos. Así, los rayos más *refrangibles* están todos dispuestos a exhibir un color *violeta* profundo, y, por lo contrario, aquellos que están dispuestos a exhibir tal color violeta son los más refrangibles de todos. Y así a todos los colores intermedios en una serie continua pertenecen grados intermedios de refrangibilidad. Y esta analogía entre colores y refrangibilidad es muy precisa y estricta: los rayos siempre concuerdan exactamente en ambos, o difieren en forma proporcional en ambos.

3. La especie de color y el grado de refrangibilidad propia a cualquier tipo particular de rayos no es mutable por refracción, ni por reflexión de cuerpos naturales ni por ninguna otra causa que pude observar. Cuando cualquier tipo de rayo había sido bien separado de aquellos de otros tipos, retenía su color con obstinación, a pesar de mis grandes esfuerzos por cambiarlo. Lo he refractado con prismas y lo he reflejado con cuerpos, que a la luz del día eran de otros colores; los he interceptado con la capa de aire colorida entre dos placas de cristal presionadas; lo he transmitido a través de medios coloridos y a través de medios irradiados con otro tipo de rayos, y lo he terminado de forma distinta, y aun así no pude producir ningún color nuevo con

él. Al concentrarlo o dilatarlo se tornaba más intenso o débil, y por la pérdida de muchos rayos, en algunos casos muy oscuro y sombrío; pero nunca pude verlo cambiar *en especie*.

4. Aun así se pueden hacer aparentes transmutaciones de colores donde exista cualquier mezcla de diferentes tipos de rayos. En esas mezclas no aparecen los colores componentes, sino que por la aleación mutua constituyen un color intermedio. Y por tanto, si sea por refracción o por cualquier otra de las causas dichas antes, los rayos disformes latentes en tal mezcla se separan, emergerán colores diferentes al color de la composición. Esos colores no son nuevos generados, sino que solo son aparentes por su separación; ya que si son de nuevo mezclados por completo, formarán el mismo color que componían antes de la separación. Y por la misma razón, las transmutaciones[21] hechas por la concentración de diferentes colores no son reales; ya que cuando los rayos disformes son separados de nuevo, exhibirán de nuevo los mismo colores que hacían antes de entrar a la composición; como se ve, los polvos *azules* y *amarillos*, cuando se mezclan finamente, aparecen al ojo de color *verde*, y aun así los colores de los corpúsculos componentes no han sido realmente transmutados por ello, sino que solo se han mezclado. Cuando se ven con un buen microscopio, aun aparecen en intervalos *azules* y *amarillos*.

5. Por tanto existen dos clases de colores. Los originales y simples, y los otros compuestos de ellos. Los colores originales o primarios son *rojo*, *amarillo*, *verde*, *azul*, y un *violeta-púrpura*, junto con el naranja, añil, y una variedad indefinida de gradaciones intermedias.

6. Por composición también pueden producirse los mismos colores en *especie* que los primarios: ya que una mezcla de *amarillo* y *azul* forma *verde*; de *rojo* y *amarillo* forma *naranja*; y un *naranja* y un *verde amarillento* forman *amarillo*. Y en general, si dos colores cualesquiera que en la serie generada por el prisma no están muy distantes el uno del otro se mezclan, por su aleación mutua compondrán aquel color que en la serie mencionada aparece en medio de ellos. Pero aquellos que están situados a

una gran distancia no lo harán. El *naranja* y el *añil* no formarán el verde intermedio, y tampoco formarán el escarlata y el verde el amarillo intermedio.

7. Pero la más asombrosa y maravillosa de las composiciones era la del *blanco*. No hay ninguna clase de rayo que por sí solo pueda exhibirlo. Siempre es compuesto, y para su composición siempre es requisito la mezcla adecuada de todos los colores primarios mencionados antes. Con frecuencia he contemplado con admiración que al hacer converger todos los colores del prisma y por ello mezclarlos de nuevo como estaban antes que fueran incidentes en el prisma, reproducían la luz completa y totalmente blanca, y sin ninguna diferencia de la luz *directa* del sol, excepto cuando los cristales que usaba no estaban lo bastante limpios; entonces se inclinaban un poco[22] a *su* color.

8. De aquí se deduce que el color natural de la *luz* es el *blanco*; ya que la luz es un agregado confuso de rayos dotados de todos los tipos de colores, ya que son lanzados con promiscuidad de las diferentes partes de los cuerpos luminosos. Y de tal agregado confuso, como ya dije, se genera el blanco, si hay una proporción adecuada de los ingredientes; pero si uno de ellos domina, la luz se debe inclinar a ese color; como ocurre en la llama azul del azufre, con la llama amarilla de una vela, y en los diferentes colores de las estrellas fijas.

9. Habiendo considerado estas cosas, la *manera* en que el prisma produce los colores es evidente. De los rayos, que constituyen la luz incidente, ya que aquellos que difieren en color proporcionalmente difieren en refrangibilidad, *ellos* por sus refracciones desiguales deben ser separados y dispersados a una forma oblonga en una sucesión ordenada desde el escarlata menos refractado al violeta más refractado. Y es por la misma razón que los objetos, cuando se les mira a través de un prisma, aparecen coloridos. Los rayos disformes, por sus refracciones desiguales, están hechos para divergir hacia partes diferentes de la *retina*, y ahí expresan las imágenes de las cosas coloridas, como hicieron en el caso anterior con la imagen del sol sobre una pared. Y por

esta desigualdad de refracciones se tornaron no solamente coloridas, sino también muy confusas e indistintas.

10. De aquí es evidente también por qué los colores del *arco iris* aparecen en las gotas de lluvia que cae. Estas gotas que refractan los rayos, dispuestos a aparecer morados, en una gran cantidad al ojo del espectador, refractan mucho menos los rayos de otros tipos como para hacerlos pasar a un lado, y tales son las gotas en el interior del arco *primario*, y en el exterior del *segundo* o exterior. Así esas gotas, que refractan en abundancia los rayos, aptos para que aparezcan rojos, hacia el ojo del espectador, refractan aquellos rayos de otro tipo mucho más, como para hacerlos pasar a un lado, y tales son las gotas en la parte exterior del arco *primario*, y la parte interior del *secundario*.

11. Los extraños fenómenos de la infusión de *Lignum Nephriticum*,[23] *oro de hoja*, *fragmentos de cristal colorido* y algunos otros cuerpos coloridos transparentes, que en una posición aparecen de un color y en otra posición de otro color, en base a esto ya no son acertijos,[24] ya que esas son sustancias aptas para reflejar un tipo de luz y transmitir otra; como se puede ver en una habitación a oscuras, al iluminarla[25] con una luz similar o descompuesta. Entonces aparecen solo de aquel color con que son iluminadas, pero en una posición más vívida y luminosa que con otra, ya que están dispuestas más o menos para reflejar o transmitir el color incidente.

12. De aquí también se manifiesta la razón de un experimento inesperado, el cual el señor *Hook* en algún lado de su *Micrographia*[26] relata haber hecho con dos vasos transparentes en forma de cuña, llenos uno con un licor rojo y el otro con uno azul: a saber, aunque eran lo bastante transparentes, al juntarse se volvieron opacos; porque si uno transmitía solo rojo y el otro solo azul, ningún rayo podía pasar a través de ambos.

13. Podría agregar más instancias de esta naturaleza, pero concluiré con esta general: que los colores de todos los cuerpos naturales no tienen otro origen más que este, que ellos están calificados de forma distinta para reflejar un tipo de luz en

mayor cantidad que los otros. Y esto lo he experimentado en una habitación a oscuras al iluminar aquellos cuerpos con luz descompuesta de diferentes colores. Por este medio cualquier cuerpo puede hacerse parecer de cualquier color. Los cuerpos no tienen un color propio, sino que aparecen siempre del color de la luz proyectada hacia ellos, pero aun con esta diferencia, aparecen más vívidos e intensos bajo la luz de su propio color de día. El *minio*[27] aparece indiferentemente de cualquier color de luz con que es iluminado, pero es más luminoso con la luz roja, y así el *bise*[28] aparece indiferentemente de cualquier color de la luz con que sea iluminado, pero es más luminoso con la luz azul. Y por tanto el *minio* refleja rayos de cualquier color, pero refleja de forma más copiosa aquellos dotados de rojo, y en consecuencia cuando se le ilumina con luz de día, esto es, con todos los tipos de rayos promiscuamente mezclados, aquellos calificados con rojo abundarán más de la luz reflejada, y por su prevalencia causarán que aparezca de ese color. Y por la misma razón el bise, reflejando copiosamente el azul, aparecerá azul por el exceso de aquellos rayos en su luz reflejada; y así parecido de otros cuerpos. Así es manifiesto que esta es la causa total y adecuada de sus colores, ya que no tienen el poder de cambiar o separar el color de cualquier tipo de rayos incidentes, sino que adoptan todos los colores de forma indiferente, aquellos con que son iluminados.

Siendo estas cosas así, no se puede discutir más si existen colores en la oscuridad, ni si son[29] las cualidades de los objetos que vemos, ni tampoco quizá, si la luz es un[30] cuerpo. Ya que los colores son las[31] *cualidades* de la luz, teniendo sus rayos como su objeto completo e inmediato, ¿cómo podemos pensar que esos rayos son *cualidades* también, a menos que una cualidad pueda ser objeto de y sostener a otro, lo cual en efecto es llamarla *sustancia*? No distinguiríamos a los cuerpos de la sustancias si no fuera por sus cualidades sensibles, y ahora que se ha encontrado que la principal de ellas se debe a algo más, tenemos una razón igual de buena para creer que es una sustancia también.

Además, ¿quién pensaría que alguna cualidad fuera un agregado *heterogéneo*, como se descubre que es la luz? Pero determinar[32,33] de manera más absoluta qué es la luz, de qué manera se refracta y por cuál modo o acción produce en nuestras mentes los fantasmas de los colores no es fácil. Y no mezclaré conjeturas con certezas.

Revisando lo que he escrito, veo que el discurso por sí solo conducirá a diversos experimentos suficientes para su examen, y por tanto no le distraeré más que para describirle uno de aquellos experimentos que ya he insinuado.

En una habitación a oscuras haga un agujero en el cierre de la ventana, cuyo diámetro puede convenientemente[34] ser la tercera parte de una pulgada, para permitir la entrada de una cantidad suficiente de luz del sol: y ahí coloque un prisma transparente e incoloro, para refractar la luz que entre hacia la parte más lejana de la habitación, que, como dije, se difuminará a una imagen oblonga de colores. Entonces coloque una *lente* de un radio aproximado de tres pies (supongamos un cristal de objetivo de un telescopio de tres pies), a la distancia de aproximadamente cuatro o cinco pies de ahí, por la que todos los colores puedan ser transmitidos al mismo tiempo, y hacer por su refracción convenir a una distancia de diez o doce pies. Si a esa distancia usted intercepta la luz con una hoja de papel blanco, usted verá a los colores tornarse en blancura al mezclarse de nuevo. Pero es requisito que el *prisma* y el *lente* sean colocados con firmeza, y que el papel en el cual los colores se proyectan sea movido de un lado a otro, ya que, por ese movimiento, no solo encontrará a qué distancia la blancura es más perfecta, sino que también verá cómo los colores gradualmente convienen y se desvanecen al blanco, y después de ha-

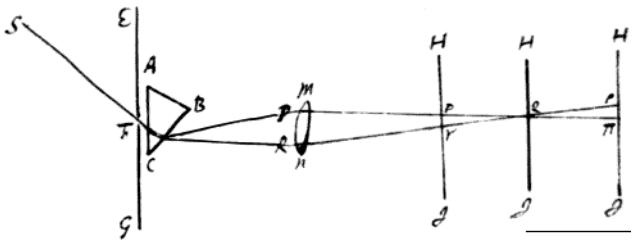


Fig. 2

berse cruzado unos con otros en ese punto donde componen la blancura, se disipan de nuevo y se separan, y en un orden invertido retienen los mismos colores que tenían antes de entrar a composición. También puede ver que si alguno de los colores en la *lente* es interceptado, la blancura se cambiará a los otros colores. Y por tanto para que la composición del blanco sea perfecta, se debe tener cuidado de que ninguno de los colores caiga al lado de la *lente*.

En el diseño[35] anexo de este experimento, *A B C* representa el prisma colocado con la terminación hacia el observador, cerca del agujero *F* de la ventana *E G*. Su ángulo vertical[36] *A C B* puede convenientemente ser de 60 grados: *M N* designa la *lente*. Su anchura de 2 $^{1}/_{2}$ o 3 pulgadas. *S F* es una de las líneas rectas, en que se puede concebir que los rayos disformes fluyan de manera sucesiva desde el sol. *F P* y *F R* son dos de esos rayos refractados en forma desigual, que la *lente* hace converger hacia *Q*, y después de la desviación divergir de nuevo.[37] Y *H I* es el papel, a diferentes distancias, sobre que se proyectan los colores; que en *Q* constituye la *blancura*, pero que es *rojo* y *amarillo* en *R*, *r* y r, y *azul* y *violeta* en *P*, *p* y π.

Si continúa para intentar la imposibilidad de cambiar cualquier color descompuesto (lo cual he postulado en las proposiciones tercera y treceava), es requisito que la habitación esté muy oscura, para evitar que cualquier luz dispersa que se mezcle con el color lo disturbe y se combine haciéndolo un compuesto, contrario a la intención del experimento. También es requisito que haya una separación más perfecta de los colores que, de forma parecida a la descrita arriba, puede hacerse por la refracción de un solo prisma, y cómo[38] hacer tales separaciones no será problema para aquellos que tomen en cuenta las leyes descubiertas de las refracciones. Pero si se llega a hacer el intento con colores que no estén separados por completo, se deben permitir cambios proporcionales a la mezcla. Así, si el amarillo compuesto cae sobre azul bise, el azul no aparecerá perfectamente amarillo, sino más bien verde, porque en la mezcla de amarillo existen muchos

rayos dotados de verde, y siendo el verde menos remoto al color azul usual del bise de lo que es el amarillo, es por él reflejado de forma más copiosa.

De forma parecida, si uno de los colores prismáticos, suponiendo el rojo, es interceptado con la intención de intentar la imposibilidad de reproducir ese color de los otros que son ignorados, es necesario ya sea que los colores estén muy bien separados antes que el rojo sea interceptado, o que sean interceptados junto con el rojo los colores vecinos hacia donde cualquier rojo es dispersado en secreto (esto es, el amarillo, y tal vez el verde también), o que se haga espacio para que emerja tanto rojo del amarillo y el verde como haya podido ser difundido y mezclado esparcidamente en esos colores. Y si se observan esas cosas, se encontrará que la nueva producción de rojo o de cualquier color interceptado es imposible.

Esto, creo, es suficiente para la introducción de experimentos de este tipo, y si cualquiera de la Sociedad Real se siente curioso por seguir, me alegraría ser informado de su éxito: y si cualquier cosa parece ser defectuosa, o[39] contravenir esta relación, podré tener una oportunidad de dar más instrucciones sobre ello, o de reconocer mis errores, si he cometido alguno.

Su humilde servidor

Isaac Newton

N O T A S

1 No se ha encontrado el manuscrito original de la carta de Newton, pero en la Colección Portsmouth (U. L. C. Add. 3970. 3, folios 460-6) se conserva una transcripción escrita por su amanuense Wickins que lleva unas cuantas correcciones verbales de la propia mano de Newton. Con unos pocos cambios verbales se imprimió la carta en las *Philosophical Transactions* en la forma que se le da aquí, excepto que (I) los pasajes mencionados más adelante en las notas 7 y 19 y (II) la firma, fueron omitidos: estos se han restaurado, de manera que la presente versión concuerda verbalmente con la transcripción. Por muchos años Newton y Wickins compartieron habitación en el colegio, y existen copias hechas por este último de varios de los manuscritos iniciales de Newton.

La carta hizo que por primera vez la teoría de los colores de Newton llamara la atención de la Sociedad Real, siendo leída el 8 de febrero de 161/2 y publicada en *Phil. Trans*. 7 (1672), 3075; aunque había tratado con esto en sus lecciones sobre óptica en la Universidad de Cambridge (1669-71), comenzando probablemente en enero 1669/70, y a finales de 1671 estaba preparando una serie de veinte de las lecciones para la imprenta. La Sociedad Real invitó al Obispo de Salisbury, a Boyle y a Hooke a que examinaran la carta y llevaran un reporte de ella.

2 Esta puede ser una referencia al experimento con un prisma descrito por Descartes en *Les Méteores*; fue diseñado para explicar la formación y los colores de un arco iris. La luz del sol, cayendo casi perpendicularmente sobre la cara en diagonal de un prisma, pasando a través de él, se refracta de la cara más baja y horizontal a una ranura hecha en soporte opaco, y causa que todos los colores del arco iris aparezcan debajo en una pantalla vertical, del rojo al azul. Ver Scott, *Descartes* (Londres, 1952), p. 76.

3 La ley de los senos, descubierta por Willebrord Snell (1591-1626) y publicada por primera vez, posiblemente en forma independiente, por Descartes en *La Dioptrique* (1637).

4 Ya que el doble de 54° 4' (el ángulo de incidencia en el prisma) es 63° 12' + 44° 56'.

5 Esto hace la altitud del sol sobre el horizonte 44° 56', lo que es consistente con un momento cercano al mediodía en verano, al "inicio del año 1666".

6 La proporción 20 a 31 concuerda aproximadamente con las figuras correspondientes 42 a 65 que aparecen en la tabla incluida, que se toma de una copia de un manuscrito anterior de Newton, 'Of Refractions' (U. L. C. Add. 4000, folio 33v).

Los senos que miden refracciones están en	Aire 42	Agua 56	Vidrio 65	Cristal 70
las proporciones de los movimientos de los rayos extremadamente heterogéneos están en	39,4.40,4	$70\frac{3}{8}.71\frac{3}{8}$	$95\frac{1}{10}$ .96	$110\frac{1}{3}.111\frac{1}{3}$
las proporciones de los senos de refracción de los rayos extremadamente heterogéneos al aire de		$90\frac{2}{3}.91\frac{2}{3}$	68.69	$61\frac{4}{5}.62\frac{4}{5}$
sus senos de incidencia comunes		$68\frac{1}{3}$	$44\frac{1}{4}$	$36\frac{4}{5}$
que restados, la diferencia es		$22\frac{1}{3}.23\frac{1}{3}$	$23\frac{3}{4}.24\frac{3}{4}$	24.25
la proporción tal para refracciones hechas al agua de			$275\frac{3}{5},276\frac{3}{5}$	$196\frac{1}{3},197\frac{1}{3}$
			$238\frac{2}{5}$	$157\frac{4}{9}$
			$37\frac{2}{5},38\frac{2}{5}$	$39\frac{1}{9}.40\frac{1}{9}$

7 Las palabras 'y la de otros' ('& others') están omitidas en *Philosophical Transactions*.

8 Es notable la precisión de la explicación de Newton sobre el viraje de la bola. Sir Graham Sutton, en su *Science of Flight*, 1949, p. 82, comentando sobre la fuerza transversal de un objeto que se mueve por un líquido si existe circulación alrededor del objeto, dice que aunque el efecto está asociado con el nombre de Magnus, un profesor alemán, en 1853, de hecho fue registrado por Newton en 1672.

9 Este comentario sigue de cerca las ideas de Descartes.

10 Ver Bacon, *Novum Organum*, II, xxxv, *instantia crucis*; Hooke, *Micrographia* (1665), p. 54, y el *O.E.D.*, *s.v.* crucial: "El pasaje en el *Novum Organum* claramente muestra que Bacon está acuñando una frase que se siente obligado a explicar por una referencia al señalamiento en una encrucijada". Hooke menciona a Bacon, pero al escribir de memoria se equivoca en la frase, *experimentum crucis*. Newton recuerda a su lectura de Hooke.

Ver More, *Newton*, pp. 98-9, para el pasaje de Hooke; trata de la hipótesis de Descartes de la conversión de la luz (*whitenesse*) en color añadiendo un movimiento rotatorio al movimiento linear de los glóbulos.

11 Note la forma tan cuidadosa en que Newton establece este hecho, de los rayos diferentemente refrangibles, sin ninguna referencia a sus colores.

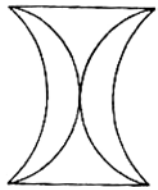
[12] La palabra 'escritores' ('writers') aquí está tachada en el manuscrito.

[13] Ver la tercera y quinta hileras de la tabla anterior. Dice en efecto que $\Delta\mu/(\mu - 1)$ es 1: 24 o 1: 25.

[14] El señor J. E. Bullard ha sugerido que Newton estaba considerando la refracción del aire hacia un sólido de vidrio convexo. Una inclinación adicional de la superficie, de magnitud Δ, produce un error angular en el rayo reflejado de 2Δ, y en el rayo refractado de $(\mu - 1)\,\mu^{-1}\Delta$. La proporción de esto llega a 5 si $\mu = {}^{5}/_{3}$, y a 6 si $\mu = {}^{3}/_{2}$. En su tabla (nota 6), $\mu = {}^{65}/_{42}$.

[15] Newton salió de Cambridge el 22 de junio de 1666, como después le escribió a Wallis: 'La plaga estaba en Cambridge en los años 1665 y 1666, pero fue en 1666 que estuve ausente de Cambridge' (de un borrador autógrafo sin fecha en la Colección Portsmouth).

[16] En 1668. El primer paso que al parecer Newton tomó para contrarrestar los efectos sobre una lente de su nuevo descubrimiento, era trabajar en una lente compuesta que consistía de dos vidrios con figuras de menisco iguales, con agua llenando el intervalo entre ellas (se refiere a esta idea en la *Carta 67*, p. 172). De haber procedido con esto en vez de cambiar a los principios de los espéculos reflejantes, muy posiblemente habría anticipado el descubrimiento y construcción de las lentes acromáticas en el siglo XVIII por Chester Moor Hall y John Dollond. En verdad pudo haberlo hecho: ver la referencia en la nota 5, a que pertenece la figura acompañante.



Newton pudo haber obtenido la idea de Hooke, quien trabajó un cristal compuesto (con uno de los vidrios plano-convexo), y al utilizar líquidos de diferentes índices de refracción varió el largo focal del compuesto (*Phil. Trans.* 1 (1665), 66 y (1666), 102). En notas que resumen las primeras *Transactions*, Newton comenta brevemente: 'Cómo el Sr. Hooke hará cualquier cristal de objetivo formarse de cualquier largo' (U. L. C. Add. 3958, folio 11v).

[17] Cf. Manuscrito, punto 31, p. 77.

[18] Oldenburg mencionó un intento de un instrumento de 6 pies de largo en su carta a Sluse del 10 de marzo 1671/2. Un tubo de esta longitud se mencionó en una reunión de la Sociedad el 8 de febrero (Birch, III, 15). Para referencias a un tubo de 4 pies ver Cartas 53, 76, 81 y 82.

[19] Las palabras desde aquí hasta 'por tanto' ('therefore') en 1.4, p. 97, fueron omitidas en las *Philosophical Transactions*; se imprimen aquí probablemente por primera vez. Es posible que Newton mismo pidiera su supresión; aunque él alude a este mismo pasaje en su respuesta a Hooke; cf. Carta 67, p. 187, 'De hecho dije que la *ciencia de los colores, era matemática y tan cierta como cualquier otra parte de la óptica*' (ver también nota 18, p.

190, y Carta 146, en la nota 22, p. 386). En lugar del pasaje omitido, las palabras en las *Philosophical Transactions* son 'Respecto al cual expondré' ('Concerning which I shall lay down'), etcétera. Hooke también alude a él en su respuesta.

[20] La palabra 'creer' ('beleive') aquí está tachada en el manuscrito.

[21] Recientemente salió a la luz una forma preliminar de la Carta Impresa (a la que aquí se le refiere como la Carta Impresa, ver nota 40), que consiste en ocho páginas numeradas de 9 a 16 y que comienzan en la parte de arriba de la p. 9 con la segunda mitad de la palabra 'Transmutations'; de ahí sigue el resto de la carta.

[22] Newton había escrito primero 'la tiñen con su color' ('tinge it with their colour').

[23] Madera nefrítica = *Moringa pterygosperma*. 'A veces hemos encontrado en las tiendas de nuestros boticarios una cierta madera que ahí es llamada *Lignum Nephriticum*, ya que los habitantes del país donde crece tienen la costumbre de utilizar la infusión de ella, hecha en agua limpia, contra la piedra en los riñones. Esta madera nos puede permitir un experimento que, además de su singularidad, puede dar una asistencia no pequeña a un observador atento hacia la detección de la naturaleza de los colores. Tome *Lignum Nephriticum*, y con un cuchillo córtela en rebanadas delgadas: ponga un puñado de estas rebanadas en dos o tres o cuatro libras del agua de manantial más pura. Decante esta agua impregnada a un frasco de vidrio, y si la sostiene directamente entre la luz y su ojo, la verá completamente teñida de un color casi dorado. Pero si aleja este frasco de la luz, y lo sostiene de manera que su ojo se coloque entre la ventana y el frasco, el líquido aparecerá de un profundo y adorable color cerúleo'. Citado de *Works* de Boyle (edición de Birch), II, 44, por Tyndall, *Six Lectures on Light* (Londres, 1875), p. 167.

Newton aludió al mismo fenómeno al principio de su "De Coloribus", un manuscrito inédito antiguo.

[24] La Carta Impresa (nota 21) tiene 'dificultades' ('difficulties') en vez de 'acertijos' ('riddles').

[25] Esta reemplaza la palabra 'ilustrar' ('illustrating'), que está tachada.

[26] Hooke publicó (1665) su *Micrographia, or some Philosophical Descriptions of Minute Bodies, made by Magnifying Glases, with Observations and Enquiries thereupon*. El libro incluye astronomía, óptica y la construcción del telescopio. La referencia es a un experimento descrito en la p. 73. Hay notas copiosas sobre la *Micrographia* en un manuscrito de Newton (U. L. C. Add. 3958 1.1).

[27] Plomo rojo.

[28] *Blue bice*, un azul pálido de carbonato de cobre azul (azurita) nativo o de esmalte.

[29] La Carta Impresa (nota 22) tiene 'ni que son' ('that they are') en vez de las palabras 'ni si son' ('whether they be'), y lo mismo ocurre en la línea siguiente, 'that' en vez de 'whether'.

[30] Esta y las notas 31 y 32 se refieren a tres notas al pie en la carta impresa, marcadas respectivamente (c), (d) y (e). Por su redacción podemos inferir que Newton mismo las escribió. Entonces:

'(c) Por una distinción impropia que algunos hacen de las hipótesis mecánicas, en aquellas en que la luz se pone como un cuerpo y aquellas donde se le pone como la acción de un cuerpo, entendiendo la primera de cuerpos que viajan por un medio, la última de movimiento o presión propagada por él, de lo primero este lugar puede ser ingenuamente entendido por algunos: mientras que la luz es igualmente un cuerpo o la acción de un cuerpo en ambos casos. Si a sus rayos se les llama los cuerpos que viajan en el primer caso, entonces en el segundo caso son los cuerpos que propagan el movimiento del uno al otro en líneas rectas hasta que el último llega al sentido. La única diferencia es que en un caso un rayo es solo un cuerpo, y en el otro muchos. Así en el segundo caso, si a los rayos se les llama movimiento propagado por cuerpos, en el primero será movimiento continuado en los mismos cuerpos. Los cuerpos en ambos casos deben causar la visión por su movimiento. Ahora en este lugar mi intención es tratar con brevedad la noción de los peripatéticos, yo no tomé el cuerpo en oposición al movimiento como en la distinción mencionada, sino en oposición a una cualidad peripatética, afirmando la cuestión entre los peripatéticos y la filosofía mecánica al cuestionar si la luz es una cualidad o un cuerpo. Que esa era mi intención puede aparecer por mi conjunción de esta pregunta con otras hasta ahora disputadas entre las dos filosofías, y utilizando respecto de un lado los términos peripatéticos *cualidad*, *sujeto*, *sustancia*, *cualidades sensibles*; respecto al otro los términos mecánicos *cuerpo*, *modos*, *acciones*, y dejando sin determinar los tipos de estas acciones (hay que suponer que son presiones, golpes u otras acciones) por las que la luz puede producir en nuestras mentes los fantasmas de los colores'.

Compare la referencia a las cualidades peripatéticas en la sección 9 de la Carta 67, p. 182.

[31] '(d) Por tanto entiéndanse estas expresiones aquí utilizadas respecto de la filosofía peripatética. Yo mismo no estimo a los colores cualidades de la luz, o de cualquier otra cosa sin nosotros, sino modos de sensación excitados en nuestras mentes por la luz. Porque son por lo general atribuidas a cosas sin nosotros, para cumplir en cierta medida con esta noción, en otros lugares de estas cartas los he atribuido a los rayos más que a los cuerpos, llamando a los rayos por su efecto en el sentido, rojo, amarillo, etcétera,

mientras que podrían de manera más apropiada ser llamados rubriforme, flaviforme, etcétera'.

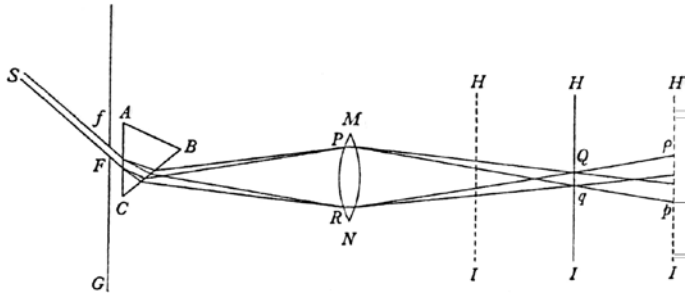
[32] '(e) Determinar de qué manera es la luz un cuerpo, o si es un cuerpo más entonces por...'

Desafortunadamente el resto de la nota al pie se perdió al recortarse la página impresa.

[33] La redacción del enunciado como fue escrito primero era 'Pero decir de manera más absoluta... no es tan fácil de determinar' ('But to say more absolutely... is not so easie to determine'), en que las palabras 'say' y 'to determine' están tachadas enfáticamente y la palabra 'determine' está escrita arriba y en lugar de 'say'.

[34] En la Carta Impresa la palabra 'convenientemente' (*conveniently*) está omitida. En la línea siguiente, en la transcripción original la palabra 'rayes' está tachada y 'light' está escrito sobre ella.

[35] En la Carta Impresa la figura es modificada y exhibe el círculo mínimo de aberración cromática *Qq* cuando el papel *HI* se sostiene en la posición intermedia:



[36] La Carta Impresa tiene 'refractante' en vez de 'vertical'.

[37] La Carta Impresa tiene '*SfP* y *SfR* otros dos rayos tales que convergen después de la refracción hacia *q* y *HI* el papel... proyectados: que en *Qq* constituyen la *blancura*...'

[38] El diagrama acompañante (Placa III9, que fue encontrado al lado reverso de un manuscrito sobre cronología en la colección New College (Oxford) (Bodleian Library), y que lleva las marcas de ser el dibujo de Newton sobre un experimento tal, muestra cómo 'la imposibilidad de cambiar cualquier color no compuesto' podía demostrarse al colocar el lente entre el agujero en el tablero y el primer prisma. El enunciado, de mano de Newton, 'Nec variat lux fracta colorem' ('ni la luz refractada cambia color'), está escrito tres veces y tachado una vez; esto puede sugerir una duda considerable de parte de Newton después de decidirse a su favor. Las iniciales 'J.E.' al pie del diagrama son casi por lo seguro las de Jeffer Ekins, decano de

Carlisle, en cuya colección de manuscritos de Newton se ha de encontrar el diagrama.

39 Las palabras 'ser defectuoso o el ser' son insertadas por mano de Newton en la transcripción.

40 El profesor I. Bernard Cohen ha proporcionado amablemente la información siguiente: 'Dos ejemplos, cada uno de una compilación (C_1 ... C_8) de un libro u opúsculo en cuarto, con número de página [9] a [16] fueron recientemente encontrados por el doctor Derek J. Price en el engargolado de un libro del siglo XVIII'. Presumiblemente las páginas anteriores contenían la parte primera de la carta con las notas al pie (a) y (b) de Newton; las notas al pie (c), (d), (e) citadas aquí (notas 30, 31 y 32) están en pp. 12 y 13.

No se puede dar una fecha específica ni para la redacción de las notas ni para la impresión del opúsculo: solo la referencia a otras cartas, en la nota (d) (ver nota 31) sugiere que se incluyeron más cartas sobre la luz y el color (como aquellas escritas entre 1672 y 1675). Es posible que la impresión mencionada por Collins, al inicio de la Carta 57, p. 146, se refiera a este opúsculo.

"Hipótesis que explica las propiedades de la luz tratadas en varios de mis ensayos"

"Hypothesis of light". Publicado en *Newton*, (a Norton critical edition), selected and edited by I. Bernard Cohen y Richard Westfall, Harvard Univesity and Indiana University, New York-London, W.W. Norton & Company, Inc., 1995. Pp. 12-34. © **The Royal Society of London**.

9 de diciembre. Se presentó un manuscrito del señor Newton, tratando su teoría de la luz y los colores, que contiene en parte una hipótesis para explicar las propiedades de la luz que discutió en sus ensayos anteriores, y en parte los fenómenos principales de los diferentes colores que exhiben las placas delgadas o burbujas, que él estima son de una consideración más difícil, pero aun así dependen también de las propiedades de la luz mencionadas.

Solo se leyó la primera parte de la hipótesis, donde se da una explicación de la refracción, reflexión, transparencia y opacidad; la segunda parte que explica los colores se pospuso a la reunión siguiente.

La primera fue como sigue:[1]

"Señor,

Le he enviado los documentos que le mencioné, de John Stiles. A su revisión, encontré que algunas cosas son tan oscuras que podrían merecer una explicación más profunda por medio de esquemas; y algunas otras, creo yo, no le serán nuevas, aunque casi todas lo eran para mí cuando las escribí. Espero que las acepte así como están, aunque no merezcan los agradecimientos que usted envió. Recuerdo, en alguna charla con el señor Hooke, ocurrió que mencioné que pensaba que la luz es reflejada no por las partes de vidrio, agua, aire u otros cuerpos sensibles, sino por el mismo confín o superficie de los medios etéreos, que la refractan, y los rayos tienen una poca dificultad para atravesarlo al pasar de un medio más denso a uno más raro, y una mayor dificultad al pasar del medio más raro al más denso; así son refractados o reflejados por esa superficie, y las circunstancias en las que están al momento de su incidencia los hacen capaces o incapaces de atravesarlo. Para confirmar esto, además dije que pensaba que la reflexión de la luz, al salir del vidrio hacia el aire,

no se disminuiría o debilitaría al sacar el aire con una bomba, como debería ser si fueran las partes del aire las que reflejaran, y añadí que no había intentado este experimento que proponía. Pero al revisar los documentos que le envié encontré que lo había registrado como experimento hecho, lo que me hace recordar que por el tiempo en que escribía estos papeles había observado en ocasiones, en una bomba de aire en el Christ's College, que no podía percibir disminución de la reflexión del interior del vidrio al sacar el aire. Me pareció apropiado mencionar esto, a no ser que mi olvido anterior, por haber puesto de lado mis ideas sobre estos temas, me hiciera tomar por cierto lo que no he intentado nunca.

Señor, antes me había propuesto nunca escribir hipótesis alguna sobre la luz y los colores, por temor a que pudiera involu-crarme en disputas vanas, pero espero que mi resolución declarada de no responder nada que parezca controversial, a menos que tenga tiempo, me pueda defender de ese temor. Considerando así que una hipótesis tal ilustraría los documentos que prometí enviarle, y con poco tiempo que perder esta semana, no tuve escrúpulos en describir una hasta donde pude en un recuento repentino de mis ideas sobre ello; sin preocuparme por si se pensará que es probable o improbable, lo que hace es hacer los documentos que le envío, y otros que envié antes, más inteligibles. Podrá ver, por los tachados y el entrelineado, que se hizo con prisa, y no he tenido tiempo para transcribirlo, lo que me permite decir que me reservo la libertad de complementarlo, y le pido que los devuelva, junto con los otros documentos, cuando haya terminado con ellos. Pienso que es mucho para leer de una sola vez, pero usted sabrá cómo arreglar eso. Al final de la hipótesis verá un párrafo que debe insertarse como se indica, debí agregar uno o dos más, pero no tuve tiempo, y espero que lo acepte así como está. Señor, estoy... etcétera.

Is. Newton.

Una hipótesis que explica las propiedades de la luz, discutida en varios de mis ensayos[2]

Señor,

En mi respuesta al señor Hooke, recordará usted, tuve oportunidad de decir algo de las hipótesis, donde di una razón de por qué todas las hipótesis permisibles en su constitución genuina deben conformar con mis teorías, y dije de la hipótesis del señor Hooke que pensaba que la aplicación más libre y natural a los fenómenos es esta:[3] que las partes agitadas de los cuerpos, de acuerdo con sus diferentes tamaños, figura y movimientos, excitan vibraciones en el éter de varias profundidades o tamaños, que al ser propagandas promiscuamente por ese medio a nuestros ojos, nos provocan una sensación de luz de color blanco; pero si de algún modo las de tamaño desigual se separan de las otras, las más grandes producen una sensación de color rojo; las menores, o más cortas, de un violeta profundo; y las intermedias, de colores intermedios, de manera muy similar en que los cuerpos, de acuerdo con sus diferentes tamaños, formas, y movimientos, excitan vibraciones en el aire de diversos tamaños, y, de acuerdo a esos tamaños, hacen diferentes tonos en sonido, etcétera. Me dio gusto saber, como yo lo entiendo por el discurso del señor Hooke de la última vez que estuve en una de sus reuniones, que había cambiado su noción anterior de que todos los colores están compuestos por dos originales, creados por los dos lados de un pulso oblicuo, y que ajustó su hipótesis a mi sugerencia de que los colores, como los sonidos, son diferentes, de acuerdo con los diferentes tamaños de los pulsos. Esta me parece ser una hipótesis más plausible que cualquier otra descrita por otros autores, porque no veo cómo pueden explicarse de forma satisfactoria los colores de placas o pieles delgadas transparentes, sin tener que recurrir a los pulsos etéreos; pero todavía hay otra hipótesis que

me gusta más, de la que tuve oportunidad de adelantar algo en la misma carta en estas palabras:[4]

La hipótesis de que la luz es un cuerpo, de haberla propuesto, tiene una mayor afinidad con la propia hipótesis del objetor de lo que parece darse cuenta, siendo las vibraciones del éter tan útiles y necesarias en esta como en la suya. Ya que, si asumimos que los rayos de luz son cuerpos pequeños que se emiten para todos lados desde las sustancias brillantes, estos, cuando chocan con cualquier superficie reflectante o refractante, necesariamente excitan vibraciones en el éter, de la manera que hacen las rocas cuando se arrojan al agua. Y, si suponemos que estas vibraciones son de diferentes profundidades o grosores, de acuerdo con como son excitadas por los rayos corpusculares de diferentes tamaños y velocidades; qué utilidad tendrán para explicar la reflexión y la refracción; la producción de calor por los rayos del sol; la emisión de luz de sustancias ardiendo, o pudriéndose, u otras sustancias cuyas partes se agitan con vehemencia; los fenómenos de las placas delgadas transparentes, y de las burbujas, y de todos los cuerpos naturales; la visión, y la diferencia de colores, así como su armonía y discordia, las dejaré a consideración de aquellos que piensen que vale la pena esforzarse en aplicar esta hipótesis a la solución de los fenómenos.

Si hubiera de adoptar una hipótesis, sería esta, propuesta de forma más general, de manera que no determine qué es la luz, más allá de que es una cosa u otra capaz de excitar vibraciones en el éter: de esta manera sería tan general e inclusiva de otras hipótesis que dejaría poco espacio para que se inventaran otras. Y por tanto, ya que he observado a grandes virtuosos pensar demasiado las hipótesis, como si a mis discursos les faltara una hipótesis para explicarse, y encontré que algunos, cuando no pude hacerlos entenderme cuando hablé de la naturaleza de la luz y los colores de manera abstracta, comprendían más fácil cuando ilustré mi discurso con una hipótesis; por esta razón me ha parecido apropiado enviarle una descripción de las circunstancias de esta hipótesis con la intención de ilustrar los documentos que le

envío. Y aunque no adoptaré ninguna hipótesis, por no parecerme necesario ocuparme de si las propiedades de la luz, descubiertas por mí, son explicadas por esta, por la del señor Hooke, o por cualquier otra hipótesis capaz de explicarlas; aun así cuando la esté describiendo, a veces para evitar circunloquios y para representarla de forma más conveniente, hablaré de ella como si la hubiese adoptado y la propusiera para que todos la creyeran. Me pareció apropiado expresar que nadie debe confundir este con mis otros discursos, o comparar la veracidad de uno por el otro, o pensar que estoy obligado a responder a objeciones hechas contra este texto: deseo declinar involucrarme en disputas tan problemáticas e insignificantes.

Para continuar con la hipótesis: primero, se ha de suponer que existe un medio etéreo de una constitución muy parecida a la del aire, pero mucho más raro, sutil, y más fuertemente elástico. Sobre la existencia de este medio, el movimiento de un péndulo casi igual de rápido en un vaso al que se le ha sacado el aire que en el aire abierto es argumento de consideración. Pero no se ha de suponer que este medio es una materia uniforme, sino que está compuesta en parte del cuerpo flemático principal del éter, en parte de otros espíritus etéreos, de manera similar en que el aire se compone del cuerpo flemático principal del aire entremezclado con diferentes vapores y exhalaciones, ya que los efluvios eléctricos y magnéticos, y el principio gravitacional, parecen apoyar esa variedad. Quizá sea que todo el marco de la naturaleza no sea nada más que varias contexturas de ciertos espíritus o vapores etéreos, condensados como por precipitación, de manera similar a como los vapores se condensan en materia, o las exhalaciones a materias más gruesas, aunque no sean tan fáciles de condensar; después de la condensación se transforman a diferentes formas, primero por la mano inmediata del Creador, y desde entonces por el poder de la naturaleza, que, en virtud de la orden, se incrementa y multiplica, se convierte en un imitador completo de las copias hechas por el protoplasto. Es así quizá como todas las cosas se originan del éter.

Al menos, los efluvios elásticos parecen instruirnos en que hay algo de naturaleza etérea condensada en los cuerpos. En ocasiones he colocado sobre una mesa una pieza redonda de vidrio de aproximadamente dos pulgadas de extensión montada en un aro de latón, de manera que el vidrio pueda estar una octava o una sexta parte de pulgada separado de la mesa, y el aire entre ambos encerrado por el aro en todas direcciones, como si hubiera volteado un cedazo sobre la mesa, y después de tallar un rato el cristal con algún material áspero, algunos fragmentos de papel muy pequeños colocados sobre la mesa debajo del vidrio comenzaron a moverse ágilmente de un lado a otro; después que dejé de frotar el vidrio, los papeles continuaban un rato en diferentes movimientos; a veces saltaban al vidrio y descansaban un rato ahí; luego saltaban hacia abajo y descansaban ahí, después saltaban hacia arriba, luego hacia abajo y luego arriba otra vez, y esto en líneas que parecían perpendiculares a la mesa; a veces en líneas oblicuas; a veces saltaban hacia arriba haciendo un arco y bajaban haciendo otro, varias veces, sin un descanso perceptible; a veces brincaban formando un arco de una parte del vidrio a otra sin tocar la mesa, y a veces colgaban de una esquina, y giraban ágilmente, como si hubieran quedado atrapados en medio de un torbellino, y a veces se movían diferente, todos los papeles con un movimiento distinto. Al deslizar mi dedo por la parte superior del vidrio, aunque ni el vidrio ni el aire encerrado se movieran por ello, los papeles recibían un movimiento nuevo, inclinándose hacia un lado u otro dependiendo de cómo moviera el dedo. Ahora bien, no puedo imaginar el origen de estos movimientos irregulares, a menos que sea de alguna especie de materia sutil que esté condensada en el vidrio, y que se rarifique por el frotamiento, como se rarifica el agua a vapor por el calor, y en esa rarefacción se difunde por el espacio alrededor del vidrio a una gran distancia, y se hace mover y circular de diferentes formas, y así actuar sobre los papeles hasta su retorno al vidrio donde se recondensa. Ya que esta materia condensada por rarefacción a un viento etéreo (por la manera fácil en que penetra y circula por el

vidrio la considero etérea) puede causar estos extraños movimientos, y al condensarse de nuevo puede provocar atracción eléctrica al regresar al vidrio a reemplazar lo que ahí se recondensa continuamente; así puede que la atracción gravitacional de la tierra sea causada por la condensación continua de algún otro espíritu etéreo, no del cuerpo principal del éter flemático, sino de algo difundido de manera muy delgada y sutil a través de él, quizá de una naturaleza aceitosa o gomosa, tenaz y elástica, y que tenga la misma relación al éter que tiene el espíritu vital aéreo, requisito para la conservación de la flama y los movimientos vitales, con el aire. Si tal espíritu etéreo puede condensarse en cuerpos en fermentación o combustión, o de otra manera coagulados en los poros de la tierra y agua a alguna especie de materia húmeda activa, por los usos continuos de la naturaleza, adhiriéndose a los lados de esos poros, de la misma manera en que los vapores se condensan en los lados de un vaso; el vasto cuerpo de la tierra, que puede que esté en trabajo perpetuo desde su centro, puede condensar continuamente tanto de este espíritu, de manera que lo hace descender desde arriba con gran celeridad para reabastecerse; en su descenso puede traer consigo a los cuerpos a los que penetra con una fuerza proporcional a las superficies de todas las partes sobre las que actúa; la naturaleza provoca una circulación por el ascenso del flujo de tanta materia de las entrañas de la tierra en forma aérea, que por un tiempo, constituye la atmósfera; pero es empujada hacia arriba continuamente por el aire nuevo; por exhalaciones y vapores que surgen de abajo, a la larga (excepto parte de los vapores, que regresan en forma de lluvia) se desvanece de nuevo a los espacios etéreos, y ahí quizá con el tiempo se disuelve, y es atenuado a su primer principio, porque la naturaleza es una trabajadora perpetua, que genera fluidos de sólidos y sólidos de los fluidos, cosas fijas de las volátiles y volátiles de las fijas, sutiles de las gruesas y gruesas de las sutiles; algunas cosas ascienden y forman los jugos terrestres superiores, ríos, y la atmósfera, y por consecuencia otras descienden para compensar las anteriores. Y, así como la tierra, quizá también el

sol instila este espíritu copiosamente, para conservar su brillo y prevenir que los planetas se alejen más de él. Y es posible suponer que este espíritu lleva consigo el combustible solar y el principio material de la luz, y que los vastos espacios etéreos entre nosotros y las estrellas son repositorio suficiente para este alimento del sol y los planetas. Pero esto de la constitución de las naturalezas etéreas es asunto secundario.

En *segundo* lugar, ha de suponerse que el éter es un medio que vibra como el aire, solo que las vibraciones son mucho más ágiles y minúsculas; las vibraciones del aire hechas por la voz ordinaria de un hombre se suceden una a la otra a más de medio pie o a un pie de distancia, pero las del éter a una distancia menor que la cienmilésima parte de una pulgada. Y, así como en el aire algunas vibraciones son más grandes que otras, pero todas son igualmente ágiles (en el timbre de las campanas el sonido de cada tono se oye a una distancia de dos o tres millas, en el mismo orden en que se golpean las campanas), así supongo que las vibraciones etéreas difieren en tamaño, pero no en agilidad. Ahora bien, además de su uso en la reflexión y refracción, se puede suponer que estas vibraciones son los medios principales por los que las partes de sustancias en fermentación o combustión, los licores fluidos, o derretidos, o ardiendo, u otros cuerpos calientes, siguen en movimiento, se sacuden como un barco por las olas, y se disipan en vapores, exhalaciones o humo, y luz liberada o excitada en estos cuerpos, y en consecuencia un cuerpo se convierte en un carbón ardiente, y en humo, llama; y, supongo yo, la llama es nada más que las partículas de humo girando por el acceso de la luz y el calor a los carbones ardientes, pequeñas e innumerables.

Tercero, ya que el aire puede penetrar en los agujeros de pequeños tubos de vidrio, pero no tan fácilmente como si estos fueran más anchos, y por tanto tiene un mayor grado de rareza que en los espacios aéreos libres, y a un mayor grado de rareza al ser el tubo más pequeño, como se sabe por la elevación de agua en esos tubos a una altura mucho mayor que la superficie de agua estancada a la que se sumergen; así supongo que el éter, aunque

penetra los poros del cristal, agua y otros cuerpos naturales, tiene un grado mayor de rareza, ya que los poros del cuerpo son más pequeños. De ahí puede ser que el espíritu del vino, por ejemplo, aunque es un cuerpo más ligero, al tener partes más sutiles, y en consecuencia poros más pequeños que el agua, es el licor de refracción más fuerte. Esta también puede ser la causa principal de la cohesión de las partes de sólidos y de fluidos, de la elasticidad del vidrio y de los cuerpos cuyas partes no se deslizan una sobre otra al doblarse, y de la permanencia del mercurio en el experimento de Torricelli, a veces hasta arriba en el vidrio, aunque esté a una altura mucho mayor de veintinueve pulgadas. El éter más denso que rodea estos cuerpos debe acumular y presionar las partes, si hay poco o nada de aire entre ellas. Sí, y el problema desconcertante, *por qué medio se contraen y dilatan los músculos para provocar el movimiento animal, puede ser aclarado más por este que por cualquier otro medio que los hombres han pensado hasta ahora*. Ya que, si existe algún poder en el hombre para condensar y dilatar a voluntad el éter que penetra el músculo, esa condensación o dilatación debe variar la compresión del músculo hecha por el éter del ambiente, y hacerlo hincharse o encogerse. Aunque el agua común escasamente se encogerá por compresión y se hinchará por relajación, el espíritu del vino y el aceite lo harán (hasta donde alcanzan mis observaciones); y el experimento del señor Boyle de un renacuajo encogiéndose mucho por la gran compresión del agua en que nadaba es un argumento de que los jugos animales hacen lo mismo. Y acerca de su presión diferente por el éter ambiental, queda claro que la presión debe ocurrir más o menos en proporción al éter que más o menos hay dentro, para sostener y contrapesar la presión por fuera. Si ambos éteres fueran igualmente densos, el músculo estaría libre, como si no tuviera presión de ninguno; si no hubiera éter dentro, el ambiente lo comprimiría con toda la fuerza de su elasticidad. Si el éter dentro estuviera el doble de dilatado de lo que está el éter de fuera, de manera que tuviera solo la mitad de su elasticidad, el ambiente tendría la mitad de la fuerza de su

elasticidad compensada por esto, y ejercería la otra mitad sobre el músculo, y así en todos los otros casos el ambiente comprime el músculo por el exceso de la fuerza de su elasticidad sobre la elasticidad del incluido. Para variar la compresión del músculo, y para hincharlo y encogerlo, no se necesita nada más que cambiar la consistencia del éter incluido, y un cambio muy pequeño sería suficiente, si se supone que la elasticidad del éter sea muy fuerte, ya que la considero muchos grados más fuerte que la del aire.

Ahora bien, para cambiar la consistencia del éter, puede que algunos estén listos para conceder que el alma tenga un poder inmediato sobre todo el éter en cualquier parte del cuerpo, para hincharse o encogerse a voluntad, pero entonces, ¿cómo depende el movimiento muscular de los nervios? Puede que otros sean más aptos para pensar que se hace por algún espíritu etéreo incluido en la *dura mater*, que puede que el alma tenga poder para contraer o dilatar a voluntad en cualquier músculo, y hacer que fluya por los nervios. Pero aun hay una dificultad, por qué esta fuerza del alma sobre él no retira el poder de su elasticidad, donde podría sostener, más o menos, la fuerza del éter exterior. Una tercera suposición sería que el alma tiene un poder para inspirar a cualquier músculo con este espíritu, al conducirlo por los nervios. Pero esto también tiene sus dificultades, ya que requiere de una tensión forzosa de la elasticidad del éter en los músculos, por la presión ejercida de las partes del cerebro, y es difícil concebir cómo una fuerza tan grande podría ejercerse desde una materia tan tierna como es el cerebro. Y además, ¿por qué este espíritu etéreo, al ser tan sutil, y provocado con una fuerza tan grande, no escapa por la *dura mater* y las pieles del músculo, o por qué al menos una porción del otro éter no sale para hacer espacio para este, que está abarrotado? Resolver estas dificultades es una digresión, pero al ver que el tema lo merece, no me detendré a decirle cómo pienso que puede hacerse.

Primero entonces, supongo que existe tal espíritu; es decir, que los espíritus animales no son ni como el licor, vapor o gas del espíritu del vino, sino que son de una naturaleza etérea, lo

bastante sutil para permear los jugos animales de forma tan libre como hacen los efluvios eléctricos, o quizá magnéticos, al vidrio. Y para saber cómo los recubrimientos del cerebro, nervios y músculos pueden convertirse en un contenedor conveniente para contener un espíritu tan sutil, usted puede considerar cómo están dispuestos los licores y espíritus para permear o no permear cosas por motivos diferentes a su sutileza. El agua y el aceite permean la madera y la piedra, lo que el mercurio no puede, y el mercurio a los metales, lo que el agua y el aceite no pueden; el agua y los espíritus ácidos permean las sales, lo que el aceite y el espíritu del vino no pueden, y el aceite y el espíritu del vino permean el azufre, lo que el agua y los espíritus ácidos no. Así algunos fluidos, como el aceite y el agua, aunque sus partes tienen libertad suficiente para mezclarse uno con el otro, por algún principio secreto de insociabilidad se mantienen separados, y algunos, que son sociables, se pueden hacer insociables al añadir un tercero a alguno de ellos, como el agua con el espíritu del vino, al disolver sal tártara en él. Esa insociabilidad puede estar en naturalezas etéreas, como quizá entre los éteres en los vórtices del sol y los planetas; y la razón por la que el aire es más raro en los confines de tubos pequeños de vidrio y el éter en los poros de los cuerpos que en otros lugares puede ser no la falta de sutileza, sino de sociabilidad. Y con base en esto, si el espíritu vital etéreo en un hombre es muy sociable a la médula y a los jugos e insociable a los recubrimientos del cerebro, nervios y músculos, o a cualquier cosa alojada en los poros de aquellos que suponemos no violentar mucho cuando los exprimimos para sacarlos, y que puede que en conjunto no sea tan sutil como el cuerpo principal del éter, aunque lo bastante sutil para permear con facilidad los jugos animales, y que, al ser utilizado, es abastecido continuamente por el nuevo espíritu del corazón.

Enseguida, para saber cómo este espíritu puede ser usado para el movimiento animal, se puede considerar cómo algunas cosas insociables se convierten en sociables por la mediación de una tercera. El agua, que no disuelve el cobre, lo hará si el

cobre se derrite con azufre; el *aqua fortis*, que no permea el oro, lo hará con la adición de una poca sal de amoniaco,[5] o espíritu de la sal; el plomo no se mezclará al derretirlo con cobre, pero si se agrega un poco de estaño o antimonio se mezclan con facilidad, y se separan otra vez si el antimonio se contamina con salitre[6] o de alguna otra forma, y así el plomo derretido con plata rápidamente permea y licua la plata a una temperatura mucho menor de la que es requisito para derretir la plata sola; pero si se conservan en la prueba hasta que esa pequeña sustancia que los reconcilió se contamina o altera, se separan de nuevo. Y, de manera similar, el espíritu etéreo animal en un hombre puede ser mediador entre el éter común y los jugos musculares, para hacer que se mezclen de manera más libre, y así, al enviar un poco de este espíritu a cualquier músculo, aunque sea tan poco que no provoque una tensión perceptible del músculo por su propia fuerza, aun así, al hacer a los jugos más sociables al éter externo común, puede provocar que ese éter permee el músculo por su cuenta en un momento de forma más libre y copiosa de lo que de otra manera podría hacerlo, y retirarse de nuevo libremente, tan pronto como se retire este mediador de sociabilidad. De aquí se explicaría, de acuerdo con lo que dije antes, el hinchamiento o encogimiento del músculo, y en consecuencia el movimiento animal que depende de ello.

Por tanto puede que el alma, al determinar la dirección de este o aquel espíritu o viento etéreo hacia este o aquel nervio, quizá con tanta facilidad como el aire se mueve en los espacios abiertos, provoque todos los movimientos que vemos en los animales; ya que al hacer fuertes esos movimientos, no es necesario que supongamos que el éter dentro del músculo esté condensado o rarificado por este medio, solo que su elasticidad es tan grande que una pequeña alteración de su densidad provocará una gran alteración en la presión. Y lo que se dice del movimiento muscular se puede aplicar al movimiento del corazón, solo con esta diferencia, que el espíritu no se envía ahí, como a otros músculos, sino que es generado continuamente por la fermentación de los

jugos, con lo que su carne se reabastece, y al generarse, sale intermitentemente hacia el cerebro por medio de algún ducto conveniente para realizar estos movimientos en otros músculos por impresión, que hizo en el corazón por su generación. No veo por qué el fermento en el corazón no puede sacar un espíritu tan sutil de sus jugos como para provocar estos movimientos, como se puede hacer al tallar un vidrio para causar atracción eléctrica, o al quemar un combustible para penetrar el vidrio, como ha demostrado el señor Boyle, y calcinar por corrosión los metales derretidos en él.

Hasta ahora he contemplado la naturaleza del éter y las sustancias etéreas por sus efectos y usos, y ahora es turno de la consideración de la luz.

En cuarto lugar, supongo que la luz no es éter, ni su movimiento vibratorio, sino algo de una especie distinta propagada desde los cuerpos luminosos. Los que deseen pueden suponer que es un agregado de varias cualidades peripatéticas. Otros pueden suponer que es una multitud de corpúsculos inimaginablemente pequeños y ágiles de diferentes tamaños, que surgen de los cuerpos brillantes a grandes distancias uno después del otro, pero sin un intervalo sensible de tiempo, y son impulsados continuamente por un principio de movimiento, que en un principio los acelera, hasta que la resistencia del medio etéreo iguala esa fuerza, a la manera en que los cuerpos que caen en el agua se aceleran hasta que la resistencia del agua iguala la fuerza de gravedad. Dios, quien dio a los animales movimiento autónomo más allá de nuestra comprensión, es capaz sin duda de implantar otros principios de movimiento en los cuerpos, del que al igual podemos comprender poco. Algunos fácilmente concederían que puede ser espiritual, pero podría demostrarse que es mecánica, si no pensara que es mejor dejarla pasar. Pero aquellos a quienes no les guste pueden suponer que la luz es cualquier otra emanación corpórea, o cualquier impulso o movimiento de cualquier otro medio o espíritu etéreo difundido por el cuerpo principal del éter, o lo que puedan imaginar apropiado para este propósito. Para evitar una disputa y

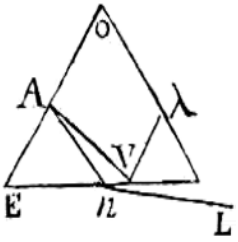
hacer esta hipótesis general, que cada hombre crea lo que quiera: solo que, cualquiera que sea la naturaleza de la luz, supongo yo que consiste en rayos que difieren entre sí en circunstancias contingentes, como la grandeza, forma, o vigor; como las arenas en la playa, las olas del mar, los rostros de los hombres, y todas las otras cosas naturales del mismo tipo difieren; siendo casi imposible no encontrar variedad contingente para cualquier tipo de cosas. Y además la supongo diversa, por las vibraciones del éter, porque (además de que fueran vibraciones, deberían siempre fluir de forma tan copiosa en líneas retorcidas hacia el medio oscuro o quieto, destruyendo todas las sombras; y cumpliría fácilmente con cualquier poro o pasaje retorcido, como hacen los sonidos) no veo cómo cualquier superficie (como el lado de un prisma de vidrio, en que los rayos son incidentes a un ángulo mayor a cuarenta grados) puede ser totalmente opaca. Las vibraciones que chocan contra el confín refractante del éter más raro y más denso deben hacer esas superficies dúctiles onduladas, y esas ondulaciones agitarán y propagarán vibraciones del otro lado. Y además, cómo la luz incidente en pieles o placas muy delgadas de cualquier cuerpo transparente puede ser reflejada y transmitida alternadamente por los muchos grosores sucesivos de la placa en progresión aritmética, como he encontrado que hace, me deja también perplejo. La progresión aritmética de aquellos grosores, que reflejan y transmiten los rayos alternadamente, es argumento de que depende del número de vibraciones entre las dos superficies de la placa si el rayo puede ser reflejado o transmitido: aun así no puedo ver cómo el número puede variar el caso, sea mayor o menor, completo o en parte, a menos que se asuma que la luz es algo más que esas vibraciones. Podría suponer algo que ayudara a ambas dificultades, pero nada me parece suficiente.

Quinto, ha de suponerse que la luz y el éter actúan mutuamente entre sí, el éter al refractar la luz, y la luz al calentar al éter; y que el éter más denso actúa de forma más fuerte. Cuando un rayo se mueve a través de éter de densidad desigual, supongo yo que está muy presionado o urgido por el medio en ese lado

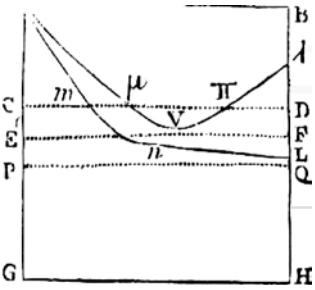
hacia el éter más denso, y recibe un impulso continuo o dobla de ese lado para separarse hacia el medio más raro, y así se acelera si se mueve en esa dirección o se retrasa si se mueve en sentido contrario. Con base en esto, si un rayo se mueve de manera oblicua por un medio de densidad tan desigual (esto es, de manera oblicua a esas superficies imaginarias que corren por las partes igualmente densas del medio y que pueden llamarse superficies refractantes) se debe curvear, como se ha encontrado que ocurre mediante la observación en el agua,[7] cuyas partes inferiores fueron hechas gradualmente más saladas, y por tanto más densas que las superiores. Y puede que esta sea la base de toda refracción y reflexión, ya que el aire más raro dentro de un tubo de vidrio pequeño y el más denso fuera no se distinguen por una superficie matemática, sino que tienen aire en medio, en el orificio del tubo, corriendo por todos los grados intermedios de densidad, así supongo yo que la superficie refractante del éter, entre medios de densidad desigual, no es una matemática, sino que tiene un grosor, el del éter dentro, en los orificios de los poros del cuerpo sólido, con todos los grados intermedios de densidad entre los medios etéreos más raros y más densos, y la refracción concibo que proviene de la curvatura continua del rayo mientras pasa por la superficie física. Ahora bien, si se supone que el movimiento del rayo aumenta o disminuye en este pasaje en cierta proporción, de acuerdo con la diferencia de las densidades de los medios etéreos, y la adición o detracción del movimiento se puede suponer en la perpendicular de las superficies refractantes, como debería ocurrir, los senos de incidencia y refracción serán proporcionales, de acuerdo con lo que ha demostrado Descartes.

Por tanto el rayo, al pasar del medio más raro al más denso, se inclina continuamente más y más hacia el paralelismo con las superficies refractantes, y si las diferencias de densidad de los medios no son tan grandes, ni la incidencia del rayo tan oblicua para hacerlo paralelo a la superficie antes de atravesar, entonces atraviesa y se refracta; pero si por las causas mencionadas antes el rayo se hace paralelo a esa superficie antes de que atraviese,

entonces debe volver y ser reflejado. Así se puede observar por ejemplo en un prisma de vidrio triangular O E F, que los rayos



A *n*, que salen del vidrio hacia el aire, al inclinarlos más y más hacia las superficies refractantes, emergen de manera más y más oblicua hasta que son oblicuos infinitamente; es decir, de una manera paralela a la superficie, que ocurre cuando el ángulo de incidencia es de aproximadamente cuarenta grados; además, si se inclinan un poco más son reflejados, como en A V λ, al hacerse, supongo yo, paralelos a la superficie antes de que puedan atravesarla. Sea que A B D C representan el medio más raro; E F H G el medio más denso; CDFE el espa-



cio entre ellos, o la superficie física refractante en que el éter tiene todos los grados intermedios de densidad, desde el éter más raro en C D al más denso en E F; A *m n* L un rayo; A *m* su parte incidente; *m n* su curva por la superficie refractante, y *n* L su parte emergente. Ahora, si el rayo A *m* está tan curvado como para hacerse al emerger en *n* lo más cerca que pueda estar paralelo a C D, queda claro que si un rayo fuera incidente de una forma un poco más oblicua, se habría hecho paralelo a C D antes que llegara a E F, el lado más lejano de la superficie refractante, y de tal manera no podría haberse acercado más a E F, sino que habría dado la vuelta por una mayor curvatura y se habría reflejado, como se representa en A μ V λ. Habría pasado algo similar si la densidad del éter se hubiera incrementado de E F a P Q; de manera que P Q H G podría ser un medio más denso de lo que se había supuesto de E F H G; el rayo entonces, al pasar de *m* a *n*, con una curva tan grande que haga que en *n* sea paralelo a C D o P Q, es imposible que se acerque más a P Q, a menos que empiece en *n* con una curvatura mayor para volver y así ser reflejado. Además, si un

rayo refractado, como *n* L, se hace un poco incidente, el rayo incidente, A *m*, se convertirá en el rayo refractado, y por tanto, si el rayo A μ V, después de que ha llegado a V, donde creo que estaría paralelo a la superficie refractante, se refractara de forma perpendicular hacia atrás, volvería en la línea de incidencia V μ A. Por tanto, al ir hacia delante, iría hacia delante en la otra línea, V π λ, siendo ambos casos similares y reflejados a un ángulo igual al ángulo de incidencia.

Puede que esta sea la causa y la manera de la reflexión, cuando la luz tiende del éter más raro al más denso, pero para saber cómo se reflejaría cuando sale del medio más denso al más raro hay que considerar además cómo los fluidos cerca de sus superficie son menos dúctiles y blandos que en sus partes más internas, y si se forman en placas delgadas, o caparazones, se hacen mucho más rígidos y tenaces que nunca. Entonces, las cosas que en agua caen con facilidad, si se dejan caer en una burbuja no atraviesan fácilmente, sino que pueden deslizarse por los lados, si no son muy grandes y pesadas. Así que si dos cristales convexos bien pulidos, colocados sobre esferas muy grandes uno encima del otro, el aire entre ellos sale fácilmente, hasta que casi se tocan; pero después empieza a resistir de tal manera que el peso del cristal superior es muy poco para juntarlos y hacer que el negro, que mencioné en los otros documentos que le envié, aparezca a la mitad del aro de colores, y si los cristales son planos, aunque no sean más anchos que una moneda de dos peniques, un hombre con toda su fuerza no puede sacar todo el aire entre ellos como para hacer que se toquen por completo. También puede observar que los insectos caminan sobre el agua sin mojarse los pies, sostenidos por el agua; también las motas de polvo que caen sobre el agua a menudo permanecen un tiempo sin mojarse, y así, supongo yo, el éter en el confín de dos medios es menos dúctil y blando que en otros lugares, y es menos dúctil dependiendo de cómo los medios difieren en densidad, así que al pasar del éter más denso al más raro, cuando queda muy poco del éter denso que atravesar, el rayo encuentra una dificultad mayor a la ordinaria

para atravesar, y una dificultad mayor donde los medios sean de densidad muy diferente, de manera que se reflejen en una curva, de la manera que se describió antes; las partes del éter en ese lado donde son menos dúctiles y blandas actúan sobre el rayo de la misma manera en que harían si fueran más densos ahí de lo que eran del otro lado: la resistencia del medio debe tener el mismo efecto en el rayo, cualquiera que sea su causa. Esta supongo que puede ser la causa de la reflexión del mercurio y de otros cuerpos metálicos. También debe contribuir a incrementar la virtud reflectiva de la superficie cuando los rayos tienden del medio más raro al más denso, y por tanto en ese caso, al tener la reflexión doble causa, debe ser más fuerte que en el éter, como al parecer es. Pero en la refracción esta tenacidad rígida o inductibilidad de la superficie no necesita considerarse, porque así como el rayo se dobla al pasar a la parte más tenaz y rígida de la superficie, de nuevo vuelve a desdoblarse al pasar de ahí a las partes siguientes gradualmente menos tenaces.

Así pueden los rayos refractarse en unas superficies pero reflejarse en otras, dependiendo de si el medio al que tiendan es más denso o más raro. Pero aun sigue por explicarse cómo rayos similares que inciden en la misma superficie (supongamos de cristal o agua) pueden al mismo tiempo refractarse unos y reflejarse otros. Y para explicar esto supongo yo que los rayos, al chocar con la superficie rígida etérea renovable, al tener un efecto en ellos, así ellos reaccionan sobre la superficie y provocan vibraciones, como hacen las rocas arrojadas al agua a su superficie, y que estas vibraciones se propagan en todas direcciones hacia los medios raros y más densos; como las vibraciones del aire, que causan el sonido, vienen de un golpe, pero continúan más fuertes en donde comienzan, y contraen y dilatan alternadamente el éter en esa superficie física. Queda claro, por el calor que la luz produce en los cuerpos, que es capaz de poner sus partes en movimiento, y mucho más capaz de calentar y poner en movimiento el éter más tierno. Es más probable que comunique el movimiento a las partes gruesas de los cuerpos por mediación del éter que de

manera inmediata, como por ejemplo en las partes internas del mercurio, estaño, plata, y otros cuerpos muy opacos, mediante la generación de vibraciones que corren por ellos en vez de golpear solo las partes exteriores sin entrar al cuerpo. El impacto de cada rayo debe generar varios miles de vibraciones y, al propagarse por todo el cuerpo, mover todas las partes, quizá con más movimiento del que podría mover una sola parte por un golpe inmediato; puede que las vibraciones, al sacudir cada partícula hacia atrás y hacia adelante, aumenten su movimiento, como un campanero hace al jalar varias veces la campana, y así a la larga mueven las partículas a un grado de agitación mayor, que no podrían hacer ni un único impacto de un rayo ni ningún otro movimiento en el éter, solo uno vibratorio. Así en el aire encerrado en un vaso, el movimiento de sus partes provocado por el calor, cuan violento que sea, es incapaz de mover los cuerpos que cuelgan en él, sea con un movimiento tembloroso o progresivo; pero si el aire es puesto en movimiento vibratorio al golpear uno o dos tambores, sacude ventanas de vidrio, el cuerpo de un hombre y otras cosas voluminosas, en especial las de un tono congruente; sí, he observado sin lugar a dudas que sacuda un piso de piedra de un gran salón, de manera que creo que no habrían podido hacer de forma inmediata los golpes a quinientos tambores, a menos que en rápida sucesión a intervalos iguales de tiempo. Las vibraciones etéreas son por tanto el mejor medio por el que un agente sutil como la luz puede sacudir las partículas gruesas de cuerpos sólidos para calentarlos; así suponiendo que la luz, al chocar en una superficie reflectante o refractante etérea la pone en movimiento vibratorio, y esa superficie física por el apulso perpetuo de rayos se mantiene siempre en movimiento vibratorio y el éter en ella es expandido y comprimido continuamente, por turnos; si un rayo de luz choca sobre el éter cuando está comprimido, supongo que está muy denso y rígido para dejar que pase el rayo, y entonces lo refleja; pero los rayos que chocan en el éter en otros momentos, cuando está expandido en el intervalo de dos vibraciones, o no tan comprimido y condensado, pasan y se refractan.

Puede que en todos los casos estas sean las causas de las refracciones y reflexiones, pero para comprender cómo llegaron a ser tan regulares, además hay que considerar que en un montículo de arena, aunque la superficie esté irregular, si se vierte agua para llenar los poros, el agua cubrirá uniformemente la superficie tan pronto como se llenan los poros, y al ser la arena más fina, lo cubrirá más uniformemente: así, aunque la superficie de los cuerpos, incluso la más pulida, sea irregular, como lo imagino, donde esa irregularidad no sea muy grande y gruesa, la superficie etérea refractante puede recubrirla uniformemente. Al pulir cristal o metal, no hay que pensar que la arena, masilla o cualquier otro polvo abrasivo desgasta la superficie de forma tan regular que hace el frente de cada partícula exactamente plano y todos esos planos miran en la misma dirección, como deben hacer en los cuerpos bien pulidos si la reflexión fuera realizada por sus partes: pero pensar que esos polvos abrasivos desgastan los cuerpos primero a una irregularidad gruesa, en una medida razonable, y después a una irregularidad más y más fina, hasta que sea tan fina que la superficie etérea la cubra uniformemente, y así hacer que el cuerpo tenga apariencia de pulido, es una suposición muy natural y comprensible. Asimismo en los fluidos, no se puede pensar que las superficies de sus partes son todas planas y que los planos de las partes superficiales siempre miran en la misma dirección, a pesar de que están en movimiento perpetuo. Y aunque no se tengan estas dos suposiciones, la superficie de los fluidos no podría ser reflectiva de forma tan regular como lo es si la reflexión fuera hecha por las partes y no por una superficie etérea que cubra uniformemente el fluido.

Además, con respecto al movimiento regular de la luz, se puede sospechar si las diferentes vibraciones del fluido por el que pasa podría perturbarla, pero yo supongo que esa sospecha se desvanecerá al hacer la consideración de que si en un momento dado la parte más adelantada de una onda oblicua empieza a desviarse, la parte trasera, por acción contraria, la enderezaría pronto.

Por último, ya que sin duda hay en cada cuerpo transparente poros de varios tamaños y mencioné que el éter tiene su mayor rareza en los poros más pequeños, por tanto el éter en cada poro debe tener una rareza distinta, y así la luz se refractaría al pasar de cada poro al siguiente, lo que causaría una gran confusión y arruinaría la transparencia del cuerpo. Pero considerando que el éter, en todos los cuerpos densos, se agita por vibraciones continuas y estas vibraciones no pueden realizarse sin forzar a las partes del éter a moverse hacia adelante y hacia atrás, de un poro a otro, por alguna clase de temblor, de manera que el éter, que en un momento está en un poro más grande, al siguiente momento es forzado hacia uno menor; y por el contrario, esto debe esparcir el éter uniformemente a todos los poros que no excedan cierto tamaño, supongamos que el ancho de la vibración, y así hacerlo de una densidad uniforme a lo largo del cuerpo transparente, en correspondencia a los poros de tipo medio. Pero donde los poros excedan cierto tamaño, supongo que el éter ajusta su densidad al tamaño del poro, o al medio dentro del poro, y al ser de una densidad diferente del éter que lo rodea, refracta o refleja la luz en su superficie, y así en donde hay muchos de tales intersticios, hacen que el cuerpo parezca opaco".

Algunos de los miembros que tuvieron un interés particular, entre otras cosas, en un experimento mencionado en esta hipótesis, solicitaron que se intentara; a saber, colocar sobre una mesa una pieza redonda de vidrio, de aproximadamente dos pulgadas de ancho, en un aro de latón, de manera que el vidrio quedara a un tercio de pulgada separado de la mesa, y después tallar el vidrio vigorosamente, hasta que unos fragmentos pequeños de papel colocados entre la mesa y el vidrio comenzaran a atraerse y moverse ágilmente de un lugar a otro; después de terminar de tallar el vidrio, los papeles continuaron un rato en varios movimientos, a veces saltando al vidrio y descansando ahí un tiempo, y brincando hacia abajo y descansando ahí, luego brincando

hacia arriba y de nuevo hacia abajo, y esto a veces en líneas que parecían perpendiculares a la mesa y a veces en líneas oblicuas; a veces también brincaron formando un arco, y brincaron hacia abajo en otro arco varias veces seguidas, sin un descanso sensible entre ellas; a veces saltaron en un semicírculo de una parte del vidrio a otra, sin tocar la mesa, y a veces colgaban de una esquina, y giraban muy rápido, como si estuvieran atrapados en mitad de un torbellino, y con otros movimientos diversos, cada papel con un movimiento diferente. Y al deslizar un dedo por el lado superior del vidrio, aunque no se moviera ni el vidrio ni el aire debajo, los papeles aun así, al estar colgados bajo el vidrio, recibían algún nuevo movimiento, inclinándose hacia allá o hacia acá, de acuerdo a como se moviera el dedo.

El señor Newton propuso que este experimento tuviera la variante de utilizar un latón más grande colocado a una distancia mayor de la mesa, y usar trozos de hoja de oro en vez de papeles, con la idea que así se tendría mayor éxito en hacer que la hoja de oro se elevara y cayera en líneas espirales, o que se revolviera en el aire durante un tiempo, sin tocar la mesa o el vidrio.

Se ordenó que este experimento se intentara a la reunión siguiente; el señor Hooke prometió prepararlo para esa reunión.

El señor Oldenburg deseó solicitar por carta al señor Newton si daría su permiso de que se tomara una copia de sus papeles, para una mejor consideración de sus contenidos.

* * *

16 de diciembre. Se intentó el experimento del señor Newton del vidrio frotado para causar varios movimientos en pedazos de papel, pero no fue exitoso en las circunstancias en que fue intentado. El experimento se hizo ante la lectura de una carta suya dirigida al señor Oldenburg, fechada en Cambridge el 14 de diciembre de 1675,[8] en la que da instrucciones más detalladas sobre el experimento.

La carta decía lo siguiente:

"El aviso que me dio de la intención de la Sociedad Real de ver el experimento del vidrio frotado, para causar varios movimientos en pedazos de papel por debajo, hizo que me pusiera a pensar en ello un poco más, y entonces recordé que, si un lado del aro de latón se ponía hacia abajo, el vidrio estaba a la misma distancia de la mesa que cuando el otro lado se ponía hacia abajo, y que los papeles se movían más cuando el vidrio estaba más cerca de la mesa; comencé a sospechar que había registrado una distancia mayor del vidrio a la mesa de la que debí; ya que al registrar ese experimento me confié en la idea que tenía del tamaño del aro, en la que pude fácilmente estar equivocado, al no haberlo visto por un largo tiempo. Y esta sospecha aumentó al intentar el experimento con el cristal de objetivo de un telescopio, colocado a un tercio de pulgada de la mesa; ya que no podía ver que los papeles se movieran tan bien como los había visto antes. Por lo tanto busqué el viejo aro con el vidrio, y por fin encontré el aro, no así el vidrio; pero por el aro pude percibir que cuando un lado estaba hacia abajo, el vidrio quedaba a casi un tercio de pulgada de la mesa, y cuando el otro borde estaba hacia abajo, lo que hacía que los papeles se movieran muy bien, el vidrio estaba apenas a un octavo de pulgada de la mesa. Me pareció adecuado remarcarle que, si el experimento no tuvo éxito a la distancia que registré, se puede intentar a menor distancia, y que puede alterar mi escrito y anotar en él un octavo de pulgada en vez de $^{1}/_{6}$ o $^{1}/_{3}$ de pulgada. Los pedazos de papel deben ser muy pequeños, y de papel delgado; quizá unos trozos pequeños de las alas de una mosca o de otras sustancias ligeras funcionen mejor que el papel. Algunos de los movimientos, como el de quedar colgado de una esquina y girar, y el de brincar de una parte a otra del vidrio sin tocar la mesa, ocurren pero muy poco; eso hizo que fueran más notorios para mí.

Le ruego presentar mis humildes saludos al señor Boyle, cuando lo vea, y agradézcale el favor de la conversación que tuve

con él en primavera. Mi idea de trepanar el éter común, como él lo expresó, me hace tener mejores pensamientos en eso que él admitió con una sonrisa. Supongo que cuando tenga una serie de experimentos que hacer con su bomba de aire, intentará ese para ver cómo la compresión y relajación de un músculo lo encogerá o hinchará, suavizará o endurecerá, alargará o acortará.

Sobre el registro de los dos discursos, lo pueden hacer, solo que deseo que lo suspendan hasta mi próxima carta, en la que me propongo indicar algo que se debe alterar y algo que se debe añadir a la hipótesis".

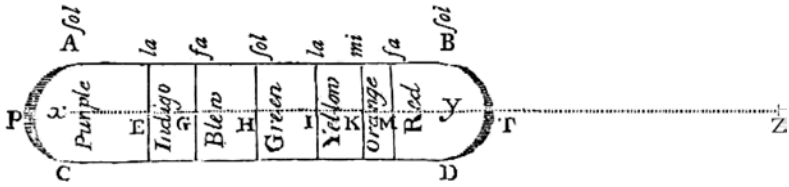
Se ordenó que el señor Oldenburg escribiera de nuevo al señor Newton y le informara del fracaso de su experimento y solicitara el aparato con el que lo realizó; también que le preguntara si tomó precauciones para que el aire que de alguna manera pudiera infiltrarse no moviera los papeles.

Acto seguido se leyó hasta su fin la secuela de su hipótesis, de la que se leyó la primera parte en la reunión anterior.

"Hasta aquí sobre la refracción, reflexión, transparencia y opacidad; y ahora, la explicación de los colores: yo creo que así como los cuerpos de varios tamaños, densidades o sensaciones, por percusión o por otra acción excitan sonidos de varios tonos, y en consecuencia vibraciones en el aire de varios tamaños, los rayos de luz, al chocar en la superficie rígida refractante excitan vibraciones en el éter, y estos rayos, cualquiera que sea su naturaleza, ya que difieren en magnitud, fuerza o vigor, excitan vibraciones de varios tamaños; los rayos más grandes, más fuertes o más potentes, las vibraciones más grandes, y otros más cortas, de acuerdo con su tamaño, fuerza o potencia: y por tanto las terminaciones de los filamentos del nervio óptico, que cubren o están frente a la retina, al ser superficie refractante cuando los rayos chocan sobre ellos, deben excitar estas vibraciones, y estas vibraciones (como las del sonido en un tronco o trompeta) correrán a lo largo de los poros acuosos o humor vítreo de los filamentos por los nervios

ópticos hacia el cerebro (lo que la luz no puede hacer) y ahí, supongo, afectarán el sentido con varios colores de acuerdo con su tamaño y mezcla; las más grandes con los colores más fuertes, rojos y amarillos; las más pequeñas con los más débiles, azules y violetas; las medianas con verde, y una confusión de todo con blanco, a la manera en que en el sentido del oído la naturaleza utiliza vibraciones aéreas de varios tamaños para generar sonidos de diferentes tonos; pues es de observarse la analogía de la naturaleza. Y además, así como la armonía y discordancia de los sonidos procede de las proporciones de las vibraciones aéreas, así puede que la armonía de algunos colores, como la del dorado y el azul, y la discordancia de otros, como rojo y azul, proceda de las proporciones de las vibraciones etéreas. Y posiblemente se pueda distinguir el color en sus grados principales, rojo, naranja, amarillo, verde, azul, añil y violeta profundo, al igual que el sonido en una octava está graduado en tonos. Hace algunos años, con los colores prismáticos proyectados perpendicularmente en un papel aproximadamente a veintidós pies de distancia del prisma en una habitación oscura, le pedí a un amigo que dibujara líneas con un lápiz sobre la imagen, o pilar de colores, en donde cada uno de los siete colores mencionados estuviera más pleno y brillante, y también en donde juzgara que estuvieran sus verdaderos límites, mientras yo sostenía el papel de manera que dicha imagen cayera dentro de cierta medida que estaba marcada. Así lo hice, en parte porque mis propios ojos no son buenos críticos para distinguir colores, y en parte porque otra persona, a quien no le había comunicado mis ideas sobre este tema, no tendría otra cosa más que sus ojos para decidir en esas marcas. Repetimos esta observación varias veces, con el mismo y con otros rayos, para ver cómo concordaban las marcas en varios papeles, y al comparar las observaciones, aunque es difícil asignar los límites precisos de los colores, ya que pasan de uno a otro sin gradación sensible, aun así las *diferencias* de las observaciones fueron pocas, en especial hacia el extremo rojo, y tomando la media de las diferencias que hubo, la longitud de la imagen (considerado no

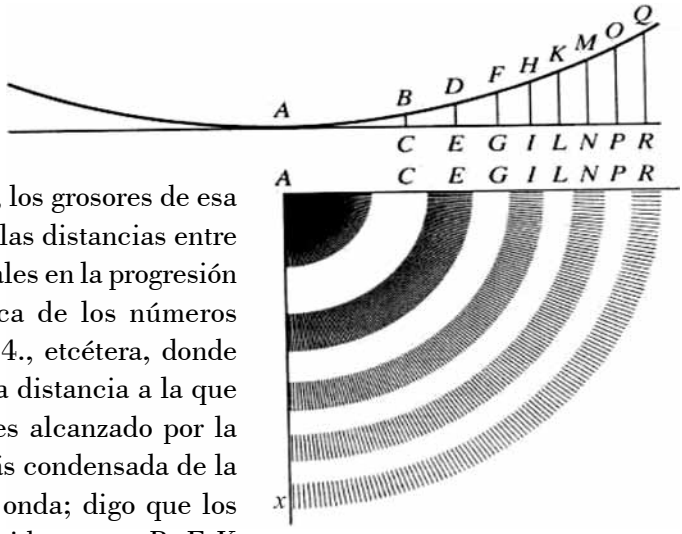
por la distancia de los límites de los extremos semicirculares, sino por la distancia de los centros de esos semicírculos, o longitud de los lados rectos según se requiera) se dividió en aproximadamente la misma proporción que una cuerda, entre el extremo y la parte media, para sonar los tonos en una octava. Me entenderá mejor si ve la figura anexa, en que A B y C D representan los lados rectos, de aproximadamente diez pulgadas de largo, A B C y B T D los extremos semicirculares, X y Y los centros de esos semicírculos, X Z la longitud de una cuerda musical del doble de X Y y dividida entre X y Y, de manera que sonaran los tonos expresados al lado (es decir X H la mitad, X G y G I la tercera



parte, Y K la quinta parte, Y M la octava parte y G E la novena parte de X Y) y los intervalos entre estas divisiones expresan los espacios que tomaron los colores aquí escritos, siendo cada color más brillantemente específico a la mitad de estos espacios.

Ahora, para la causa de estos y otros colores similares hechos por refracción, los rayos más grandes o más potentes deben penetrar la superficie refractante más fácil y libremente que los débiles, y ser desviados por ella menos, esto es, menos refractados; lo que es como decir que los rayos que hacen el rojo son los menos refrangibles y aquellos que hacen azul y violeta los más refrangibles, y otros que son refrangible en distinto grado de acuerdo con su color; de donde, si los rayos que vienen promiscuamente del sol se refractan con un prisma, exhiben cada uno sus propios colores, lo que no podían hacer mientras estaban mezclados. Y, ya que la refracción solo los separa y no cambia el tamaño o la fuerza del rayo, de ahí es que, después que están bien separados, la refracción no puede hacer más cambios en su color.

Con base en esto puede que se entiendan todos los fenómenos de las refracciones, pero para explicar los colores hechos por reflexiones, además debo suponer que, aunque la luz es inconcebiblemente veloz, aun así las vibraciones etéreas excitadas por un rayo se mueven más rápido que el rayo mismo, y así se alcanzan y rebasan una tras otra. Supongo que esta será una suposición permisible para aquellos que se han inclinado a sospechar que estas vibraciones pueden ser la luz. Pero para hacerla más permisible, es posible que la luz misma no sea tan veloz como algunos son dados a pensar, ya que, sin importar argumento alguno que conduzca a lo contrario, puede que tome una hora o dos, si no es que más, en moverse desde el sol hasta nosotros. Esta celeridad de las vibraciones por tanto supuestas, si la luz incide en una piel delgada o placa de cualquier cuerpo transparente, las ondas, excitadas por este pasaje a través de la primera superficie, alcanzándola una después de otra, hasta que llegue a la segunda superficie, causará que ahí se refleje o refracte de acuerdo con la parte condensada o expandida de la onda que ahí la alcance. Si la placa tiene un grosor tal que la parte condensada de la primera onda alcance al rayo en la segunda superficie, debe reflejarse ahí; si tiene el doble de ese grosor que la siguiente parte rarificada de la onda, esto es, el espacio entre esa y la siguiente onda la alcanza, se debe transmitir ahí; si tiene el triple de grosor, de forma que la parte condensada de la segunda la alcance, ahí se debe reflejar, y así donde la placa tiene cinco, siete o nueve veces ese grosor, se debe *reflejar* a razón de la tercera, cuarta o quinta onda que alcance la segunda superficie; pero cuando tiene cuatro, seis u ocho veces ese grosor, de manera que el rayo sea alcanzado ahí por el intervalo dilatado de esas ondas, será *transmitido*, y así seguirá; la segunda superficie es capaz o incapaz de reflejar dependiendo de si es condensada o expandida por las ondas. Por ejemplo, si A H Q representan la superficie de un cristal esféricamente convexo colocado sobre un cristal plano A I R, y A I R Q H la placa delgada plano-cóncava de aire entre ellos, y B C, D E, F G, H I,



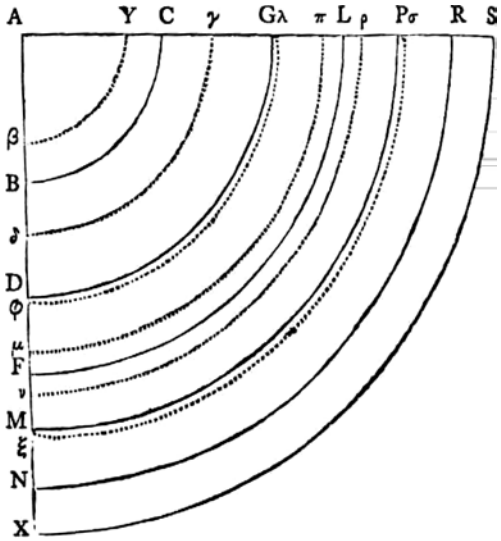
etcétera, los grosores de esa placa, o las distancias entre los cristales en la progresión aritmética de los números 1, 2, 3, 4., etcétera, donde B C es la distancia a la que el rayo es alcanzado por la parte más condensada de la primera onda; digo que los rayos incidentes en B, F, K y O, deberían *reflejarse* en C, G, L, y P, y los incidentes en D, H, M y Q deben de ser *transmitidos* en E, I, N y R, y esto porque el rayo B C llega a la superficie A C cuando se condensa por la primera onda que la alcanza; a D E, cuando está rarificada por el intervalo de la primera y la segunda; a F G cuando es condensada por la segunda onda; a H I cuando está rarificada por el intervalo de la segunda y la tercera, y así por un número indeterminado de sucesiones; y en A, el centro o contacto de los cristales, la luz se debe *transmitir*, porque ahí los medios etéreos en ambos cristales se continúan como si fueran un medio uniforme. De ahí que si se miran los cristales en esta postura, debe aparecer en A, el contacto de los cristales, un punto negro, y alrededor de él muchos círculos concéntricos de luz y oscuridad, de cuyos semidiámetros los cuadrados están en progresión aritmética y sensible. Aun así todos los rayos, sin excepción, no se deben reflejar o transmitir, ya que a veces un rayo puede ser alcanzado en la segunda superficie, por las vibraciones provocadas por otro rayo colateral o inmediatamente siguiente; esa vibración, siendo tan fuerte o más fuerte que la propia, puede provocar que sea reflejado o transmitido cuando su vibración por sí sola haría lo

contrario. Y de ahí que una poca luz será reflejada de los aros negros, que los hace negros en vez de totalmente oscuros; y una poca se transmite en los aros de luz, que hace que los aros negros aparezcan del otro lado de los vidrios, no tan negros como serían de otra manera. Y así en el punto negro central, donde los vidrios no se tocan en lo absoluto, se reflejará una poca de luz, que hace al punto más oscuro en medio, y negro solo en los bordes. Así he observado que pasa al juntar con fuerza dos prismas de vidrio atadas, que eran accidentalmente (al menos una de ellas) un poco convexas, viendo con varias luces este punto negro en su contacto. Si se colocaba un papel blanco a poca distancia detrás de una vela, y la vela y el papel se miraban alternadamente por reflexión del punto, los bordes del punto, que por la luz del papel se veían tan negros como en medio, aparecían por la luz más fuerte de la vela suficientemente lúcidos como para hacer que el punto pareciera menor que antes; pero la parte media seguía tan absolutamente negra en un caso como en el otro, excepto en algunos puntos y marcas, donde supongo que los cristales, por alguna disparidad en el pulido, no se tocaban por completo. He observado lo mismo al ver el punto por la reflexión similar del sol y las nubes alternadamente.

Pero para volver a los aros lúcidos y aros negros, esos aros siempre deben de aparecer en la manera descrita si la luz es uniforme. Y de esa manera, cuando los dos vidrios contiguos A Q y A R han sido iluminados, en un cuarto oscuro, por luz de cualquier color uniforme hecha por un prisma, he visto que los círculos lúcidos parezcan ser aproximadamente veinte en número, con muchos círculos oscuros entre ellos, siendo el color de los lúcidos el de la luz con que se iluminaron los cristales. Y si los cristales se sostenían entre el ojo y los colores prismáticos proyectados en una hoja de papel blanco, o si algún color prismático era transportado directamente por los cristales a una hoja de papel colocada un poco detrás, ahí aparecían otros anillos de color y oscuridad (en el primer caso entre los cristales; en el segundo, en el papel) correspondiendo opuestamente a aquellos, que apare-

cían por reflexión: es decir que, mientras que por la luz reflejada aparecía un punto negro en medio y después un círculo de color, por el contrario, si la luz era transmitida, aparecía un círculo de color en medio y después un círculo negro, y así sucesivamente; los diámetros de los círculos de color, hechos por la transmisión, iguales a los diámetros de los negros hechos por reflexión.

Así, digo, aparecen y deben aparecer los anillos cuando se hacen con luz uniforme; pero con la luz compuesta es distinto. Ya que los rayos que exhiben rojo y amarillo, como dije, excitan pulsos más grandes en el éter que aquellos que hacen azul y violeta, y en consecuencia hacen círculos más grandes en una cierta proporción, como he encontrado sin duda que lo hacen, iluminando los cristales sucesivamente por los colores mencionados del prisma en un cuarto oscuro, sin cambiar la posición de mi ojo o de los cristales; de ahí los círculos hechos por iluminar los vidrios con luz blanca, no deben aparecer negro y blanco alternadamente, como los círculos hechos al iluminar los cristales; por ejemplo, con la luz roja, aparecía rojo y negro; pero los colores que componen la luz blanca se deben mostrar al ser reflejados, estando el azul y el violeta más cerca del centro que el rojo y el amarillo, mientras que cada círculo lúcido debe hacerse violeta en el borde interior, rojo en el exterior y de los colores intermedios en las partes intermedias y hacerse más ancho que antes, esparciendo los colores a ambos lados hacia esos espacios, que llamo anillos negros y que aquí aparecerían negros si el rojo, amarillo, azul y violeta que hacen el borde de los anillos fueran sacados de la luz blanca incidente que ilumina los cristales, y quedaría solo la verde para hacer los anillos lúcidos. Supongamos que C B, G D, L F, P M, R N y S X representan cuadrantes de los círculos hechos en un cuarto oscuro solo por el *rojo* prismático más oscuro; y Y β, γ δ, λ ϕ, π μ, ρ ν y σ ξ los cuadrantes de círculos parecidos hechos parecidos hechos también en un cuarto oscuro, pero solo por el *violeta* prismático más profundo, y entonces, si los cristales se iluminan con luz del día, en la que están mezclados toda clase de rayos, queda claro que el primer anillo lúcido será



Y β B C, el segundo γ δ D G, el tercero λ ϕ F L, el cuarto π μ M P, el quinto ρ ν N R, el sexto σ ξ X S, etcétera, en todos aquellos en que el violeta más profundo debe reflejarse en los bordes interiores representados por las líneas punteadas, donde se reflejaría de estar solo, y el *rojo* más profundo en los bordes exteriores representados por las líneas negras, donde se reflejaría de estar solo; y todos los colores intermedios en esos lugares, en orden, entre esos bordes, donde serían reflejados de estar solos; cada uno de ellos en un cuarto oscuro partió de todos los otros colores por la refracción de un prisma. Y dado que los cuadrados de los semidiámetros de los bordes exteriores A C, A G, A L, etcétera, así como de A Y, A γ, A λ, etcétera, los semidiámetros de los interiores están en la progresión aritmética de los números 1, 3, 5, 6, 9, 11, etcétera, [&c.] y los cuadrados de los interiores están en proporción a los cuadrados de los exteriores (A Y^9 a A C^9, A γ^9 a A G^9, A λ^9 a A L^9, etcétera) como el 9 al 14 (como he encontrado al medir cuidadosamente y a menudo, y comparando las observaciones); por tanto el borde *rojo* exterior del segundo anillo, y el borde interior *violeta* del tercero, limitarán entre sí (como se puede saber por un cálculo, y verlos representados en la figura) y los bordes parecidos del tercer y cuarto anillo interferirán, y aquellos del cuarto y quinto interferirán más, y así sucesivamente. Sí, los colores de cada anillo deben esparcirse un poco más a ambos lados de lo que se representa aquí, ya que los arcos cuadrantales aquí descritos no representan los bordes

sino la parte media de los anillos hechos en un cuarto oscuro por el violeta y el rojo de los extremos; el *violeta* cae a ambos lados de los arcos punteados y el *rojo* a ambos lados de los arcos de líneas negras. Y de ahí que estos anillos o circuitos de colores se suceden continuamente, sin que intervenga negro alguno, y que los colores son puros solo en los tres o cuatro primeros anillos, y después se intervienen y se mezclan más y más, se diluyen entre sí tanto que después de ocho o nueve anillos ya no se distinguen más, sino que parecen constituir un blanco uniforme; mientras que, cuando se hicieron en un cuarto oscuro por uno de los colores prismáticos solo, he visto, como ya he mencionado, más de veinte de ellos, y sin duda pude haber visto un número mayor si me hubiera tomado la molestia de hacer el color prismático más descompuesto. Al desdoblar estos anillos de uno a otro, por ciertas refracciones expresadas en los otros[9] documentos que le envío, he descubierto, incluso en la luz de día, más de un ciento, y quizá habrían parecido *innumerables [innumerable, infinitos]*, de haber sido la luz o el color iluminando los cristales absolutamente descompuesta, y la pupila de mi ojo un punto matemático, así que todos los rayos que vienen del mismo punto del vidrio pudieran haber entrado en mi ojo con la misma oblicuidad que al cristal.

Lo que se ha dicho hasta ahora de los anillos se debe entender de su apariencia a un ojo inmóvil, pero si varía la posición del ojo, a más oblicuamente que se mire el vidrio, mayores aparecerán los anillos. Y de esto puede que la razón sea en parte que un rayo oblicuo es más largo al pasar por la primera superficie, y así hay más tiempo entre el ondeamiento hacia adelante y hacia atrás de esa superficie y en consecuencia se genera una onda más grande, y en parte porque la onda al pasar entre las dos superficies puede ser impedida y retardada por la rigidez de esas superficies, limitándola a cualquiera de los extremos, y así no alcanzar el rayo tan pronto como cruza una onda que se mueve perpendicularmente.

Los tamaños de los círculos hechos por cada color y a todas las oblicuidades del ojo hacia los cristales, y los grosores del

aire, o intervalos de los cristales, donde se forma cada círculo, los encontrará expresados en los otros documentos que le envío; también ahí he dado más detalle de cómo estos anillos interfieren o se esparcen uno sobre otro; qué colores aparecen en cada anillo, donde son más vívidos, donde y qué tanto se diluyen al mezclarse con los colores de otros anillos, y cómo los colores contrarios aparecen del lado trasero de los cristales por la luz transmitida, con los cristales transmitiendo luz de un color al mismo lugar, donde reflejan la de otro. Tampoco necesito agregar nada más de los colores de otros medios de placas delgadas, como el agua entre los cristales mencionados, o formada en burbujas y por tanto rodeada de aire, o de vidrio soplado en burbujas muy delgadas en un horno de luz, etcétera, siendo en todos estos el mismo caso, excepto que donde el grosor de la placa no es regular, los anillos no lo serán; que en placas de cuerpos transparentes los anillos son hechos a un menor grosor de la placa (siendo las vibraciones, supongo, más cortas en el éter raro que en el denso) y que en una placa más densa, rodeada por un cuerpo más raro, los colores son más vívidos que en el medio más raro rodeado del más denso, como es, por ejemplo, más vívido en una placa de vidrio rodeada con vidrio, de lo cual la razón es que la reflexión de la segunda superficie que causa los colores es, como se mencionó antes, más fuerte en el primer caso que en el último; también por esa razón los colores son más vívidos cuando la diferencia de la densidad del medio es mayor.

En esos documentos también he dicho suficiente de los colores de cuerpos naturales, demostrando cómo los variados tamaños de las partículas transparentes de que consisten es suficiente para producirlos todos, con esas partículas reflejando o transmitiendo este o aquel tipo de rayos, de acuerdo con su grosor, como las placas mencionadas antes, como si de ellas fueran fragmentos. Ya que, supongo, si una placa de un grosor uniforme, y en consecuencia de un color uniforme, se rompiera en fragmentos del mismo grosor de la placa, un montón de esos fragmentos sería un polvo de un color muy similar al de la placa. Y así, si las partes

son del grosor del agua en el punto negro en la parte superior de la burbuja descrita en la observación decimoséptima que le envié, supongo que el cuerpo debe ser negro. En la producción de tal negrura, supongo que las partículas de ese tamaño están dispuestas de tal manera que casi no reflejan luz hacia afuera, sino que la refractan continuamente en su pasaje de cada parte a la siguiente; por esta multitud de refracciones, los rayos se mantienen vagando tanto de un lado a otro dentro del cuerpo, hasta que al fin casi todos chocan en las partes sólidas del cuerpo, y así son detenidos y sofocados; esas partes no tienen elasticidad suficiente u otra disposición para devolver con suficiente rapidez el impacto del rayo sobre sí mismo.

[...]"

N O T A S

[1] *Register*, vol. v. p. 65.

[2] *The Correspondence of Isaac Newton*, H. W. Turnbull, J. F. Scott, A. Rupert Hall y Laura Tilling (editores), 7 vols. (Cambridge: Cambridge University Press, 1959–77). Newton envió la llamada "Hipótesis de la luz" en forma de una carta a Henry Oldenburg, secretario de la Sociedad Real, el 7 de diciembre de 1675, para acompañar y explicar sus observaciones en los anillos de colores (anillos de Newton) en una película delgada de aire entre una lente y una placa de vidrio.

[3] *Transact.*, n. 88, p. 5088.

[4] *Transact.*, n. 88, p. 5087.

[5] Cloruro amónico.

[6] Nitrato de potasio.

[7] Ver la *Micrographia* del señor Hooke, donde habla de la inflexión de los rayos.

[8] *Letter-book*, vol. vii. p. 280.

[9] Observación 24.

Los documentos de óptica de Newton

Thomas S. Kuhn

"Newton's optical papers". Publicado en *Isaac Newton's papers & letters on natural philosophy*, Cambridge, Massachusetts, © **Harvard University Press**, 1958. Pp. 27-45.

La publicación original de los documentos de óptica de Isaac Newton marcó el inicio de una era en el desarrollo de las ciencias físicas. Estos documentos fueron los primeros pronunciamientos públicos del hombre que ha sido para todas las generaciones subsecuentes el arquetipo de creatividad científica preeminente, y su aparición en los primeros volúmenes de las *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* constituyó la primer contribución importante a la ciencia hecha por medio de una publicación técnica, el medio que rápidamente se convirtió en el modo estándar de comunicación entre científicos.

Hasta el último tercio del siglo XVII la mayoría de las contribuciones originales a las ciencias aparecían en libros, normalmente en libros grandes: *De Revolutionibus*, de Copérnico (1543); *Astronomia Nova*, de Kepler (1609); *Dialogo*, de Galileo (1632); *Dioptrique*, de Descartes (1637) o *Experiments and Considerations Touching Colours*, de Boyle (1664). En tales libros las contribuciones originales del autor normalmente se perdían dentro de una exposición sistemática de un tema más grande, de manera que el intercambio constructivo de experimentos e hipótesis científicas era impedido por la sistematización prematura o, como en el caso de Boyle, por el solo volumen de la compilación experimental.[1] Cada científico tendía a erigir su propio sistema sobre sus propios experimentos; aquellos experimentos que no podían apoyar un sistema entero frecuentemente se perdían a la profesión embriónica.

Las primeras transgresiones importantes a este modo tradicional de presentación ocurrieron en la década de 1660. El establecimiento de la Sociedad Real de Inglaterra en 1662 y de la Academia Real de las Ciencias en Francia en 1666, la primer publicación del *Journal des Sçavans* y de las *Philosophical Transactions* en 1665, dieron expresión y sanción institucional a la nueva concepción de la ciencia como una empresa cooperativa

con objetivos utilitarios. El objetivo inmediato del científico individual se convirtió en la contribución experimental a una reconstrucción última de un sistema de la naturaleza en vez de la construcción del sistema en sí, y el artículo en la publicación –un reporte inmediato sobre la experimentación técnica o una interpretación preliminar de experimentos– comenzó a reemplazar al libro como la unidad de comunicación del científico.

Newton fue el primero en adelantar por este nuevo medio una propuesta con base experimental para la reforma radical de una teoría científica, y su propuesta fue la primera en incitar discusión y debate internacional dentro de las columnas de una publicación científica. Por medio de la discusión, en la que todos los participantes modificaron sus posiciones, se obtuvo un consenso de opinión científica. Dentro de este nuevo patrón de anuncio público, discusión y por último logro de consenso profesional la ciencia ha avanzado desde entonces.

Los documentos ópticos de Newton tienen una importancia adicional para el estudiante del desarrollo del pensamiento científico. Estos breves y ocasionalmente apresurados comunicados al editor de las *Philosophical Transactions* permiten una visión al interior de la personalidad y procesos mentales de su autor que es oscurecida por el enfoque más usual a Newton en sus *Principios* (1687) y *Óptica* (1704). En estas monumentales últimas creaciones, de las que ha surgido nuestra imagen de Newton el *padre olímpico* de la ciencia moderna, el papel creativo del autor está deliberadamente oculto por el exceso de documentación e ilustración y por la formalidad e impersonalidad de la organización.[2] Es principalmente en sus primeros documentos, así como en sus cartas, sus notas y sus manuscritos, en su mayor parte inéditos, que se ha de descubrir a Newton el científico creativo. Y el impacto del descubrimiento puede ser considerable, ya que este Newton no siempre corresponde a nuestra imagen ideal.

El primer documento de Newton, "Nueva teoría acerca de la luz y los colores", es casi autobiográfico en su desarrollo, y así facilita, más que cualquier otro trabajo científico publicado

de Newton, la búsqueda de las fuentes de los nuevos conceptos ópticos que obtuvo de los "celebrados fenómenos de los colores".[3] Los colores prismáticos a los que Newton se refería habían sido bien conocidos por siglos: los objetos blancos vistos a través de un prisma triangular de vidrio son vistos con franjas de arco iris en sus bordes; un rayo de luz solar refractado por un prisma produce todos los colores del arco iris en la pantalla sobre la que cae. Séneca registró las observaciones, que deben ser tan viejas como el vidrio roto; Witelo, en el siglo XIII, empleó un globo lleno de agua para generar colores de arco iris; para el siglo XVII, por sus impresionantes colores, [los prismas] fueron un artículo importante en las negociaciones de los jesuitas en China.[4] Antes que Newton comenzara sus experimentos al menos cuatro filósofos naturales, Descartes, Marcus Marci, Boyle y Grimaldi, habían discutido en tratados ópticos el iris colorido producido por un prisma, y Hooke había basado gran parte de su teoría de la luz en los colores generados por una refracción sencilla de la luz solar en una interfaz de aire-agua.[5] Los "fenómenos" eran en verdad "celebrados". Newton, cuando los repitió para su propia comprensión, pudo no haber tenido razón para anticipar un resultado que después describiría como "la más extraña, si no es que la más considerable detección, que hasta ahora se ha hecho en las operaciones de la naturaleza".[6]

Pero la versión de Newton del experimento difería en un aspecto esencial del empleado por la mayoría de sus predecesores; además, como veremos, la educación y experiencia óptica de Newton no fue la de los primeros experimentadores que habían empleado el prisma. Anteriormente, cuando la luz blanca había sido pasada a través de un prisma, la imagen del rayo refractado había sido observada en una pantalla colocada cerca del prisma.[7] Con semejante arreglo del aparato, los rayos divergentes de colores "puros" tenían poca oportunidad de separarse antes de chocar con la pantalla, y la forma de la imagen proyectada en la pantalla era por tanto idéntica a la que producía el rayo no refractado. Pero al pasar a través del prisma el rayo había

adquirido una franja rojo-naranja a lo largo de un borde y una franja azul-violeta a lo largo del otro.

Las franjas coloridas en un rayo de luz blanca que no ha sido alterado de otra forma parecían confirmar una teoría antigua de la naturaleza de los colores del arco iris, una teoría que sostenía que una sucesión de modificaciones de luz solar por las gotas de una nube de lluvia producía los colores del arco. En el siglo y medio que precedió el trabajo de Newton tal teoría fue reformulada repetidamente y de diferentes formas y aplicada al iris colorido generado por el prisma. En todas las teorías los colores eran vistos como una perturbación menor restringida primariamente a los bordes del rayo homogéneo de luz solar. Se debían a una mezcla de luz y sombra en la región de contacto entre el rayo refractado y la oscuridad (Descartes), o eran una consecuencia de la "condensación" y "rarefacción" variantes producidas en los bordes del rayo por la variación en el ángulo en que los rayos del sol finito eran incidentes sobre el prisma (Grimaldi), o eran generados por alguna otra modificación mecánica (Hooke y los posteriores cartesianos).

No había consenso sobre la naturaleza de la modificación particular que teñía la luz blanca, pero había acuerdo en que existía solo una modificación tal y que su aplicación positiva o negativa (por ejemplo, condensación *o* rarefacción) a la luz blanca podía producir solo dos colores *primarios*. Estos dos colores, normalmente rojo y azul, representaban las aplicaciones extremas de la modificación, de manera que su mezcla en proporciones apropiadas generaría cualquier otro color al producir el grado intermedio de modificación correspondiente. Experimentos más recientes han demostrado, por supuesto, que dos colores primarios no serán suficientes, pero experimentos de mezcla de colores realizados con equipo crudo son en extremo engañosos, un hecho que también puede explicar la inicialmente sorpresiva aseveración de Newton de que el amarillo y el azul espectrales se combinan para producir un verde.[8]

Todas las teorías de modificación de colores prismáticos fracasan ultimadamente por su incapacidad para explicar de forma cuantitativa la elongación del espectro observado cuando, como en la versión de Newton del experimento, la pantalla se coloca a una gran distancia del prisma. Pero incluso con el equipo acomodado de esa forma, no es inmediatamente aparente que la elongación del espectro es incompatible con las teorías de modificación. Ya que el sol tiene una anchura finita, los rayos de diferentes porciones de su disco son incidentes sobre el prisma a ángulos diferentes, e incluso en la ausencia de dispersión esta diferencia en ángulo de incidencia normalmente producirá una elongación del rayo refractado cualitativamente similar a la observada por Newton. Los predecesores de Newton, quienes como Grimaldi habían notado la elongación del espectro, habían empleado este dispositivo para explicarla, y esta fue la explicación dada por el jesuita Ignatius Pardies en su primera carta objetando la teoría de Newton.[9] Para destruir la teoría de modificación era necesario notar una discrepancia *cuantitativa* entre la elongación predicha por esa teoría y la elongación observada, y esto requería un experimentador con un conocimiento de la ley matemática que gobierna la refracción (no anunciada hasta 1637) y con experiencia considerable en la aplicación de la ley a problemas ópticos. En 1666 estos requisitos eran únicamente de Newton. Descartes, que compartía los intereses matemáticos de Newton, había realizado el experimento con la pantalla cerca del prisma, y no había notado elongación alguna. Boyle y Hooke, cuyo aparato probablemente generó un espectro alargado, compartían con Grimaldi una dominante indiferencia hacia el poder de las matemáticas en la física.

Fue entonces la gran elongación producida en la versión newtoniana del experimento, además del reconocimiento de que el tamaño del espectro no era el predicho por la nueva ley de refracción de Snell, lo que transformó una repetición de rutina de un experimento común en la "más extraña... detección, que

hasta ahora se ha hecho en las operaciones de la naturaleza". La extrañeza no era el espectro en sí, sino la discrepancia entre la longitud observada del espectro y la longitud predicha por la teoría existente. Y esta discrepancia, enfatizada e investigada con mucho mayor detalle matemático en las primeras presentaciones orales por Newton del experimento, le forzó a buscar una nueva teoría.[10]

Newton encontró la pista para la nueva teoría en la idealización geométrica que reportó como la forma del espectro y no en la elongación que había causado la búsqueda. Su rayo de luz solar era un cilindro de $^1/_4$ de pulgada de diámetro, formado al dejar que la luz solar entrara a su cámara a través de un agujero circular en sus "cierres de ventana". Después de la refracción el rayo caía sobre la pared opuesta de la habitación, a 22 pies de distancia del prisma, donde, de acuerdo con Newton, produjo un espectro alargado, de $13^1/_4$ pulgadas de longitud, encerrado por lados paralelos de $2^5/_8$ pulgadas de separación y terminado por extremos semicirculares. La forma sugería su propia interpretación. Porque las "terminaciones" semicirculares podían ser vistas como residuos de la forma impuesta por el agujero circular en el cierre de la ventana, y el espectro podía ser entonces analizado en una serie infinita de círculos superpuestos de colores diferentes cuyos centros yacieran en una línea recta perpendicular al eje del prisma. En sus primeras disertaciones, así como en la posterior *Óptica*, Newton frecuentemente dibujó el espectro en esta forma, un extremo formado por una imagen circular de azul puro del agujero original, el otro formado por una imagen roja pura, y la región intermedia compuesta por una cantidad de círculos de diferentes colores desplazados a lo largo del eje del espectro. Por este medio las leyes existentes de refracción, que para el arreglo del prisma de Newton predecían una imagen circular, podían preservarse. Pero la ley ahora tenía que aplicarse no al rayo incidente como un todo, sino a cada uno de los rayos coloridos contenidos en el rayo original. La luz del sol era una mezcla de todos los colores del arco iris; cada uno de los rayos de

colores incidentes obedecía las leyes de óptica; pero cada uno se refractaba a través de un ángulo diferente en su pasaje a través del prisma. Esta era la esencia de la nueva teoría de Newton, derivada primariamente de la forma reportada del espectro.[11]

La forma reportada deja un rompecabezas ilustrativo de la naturaleza del genio de Newton. Aunque el espectro descrito clama por la interpretación que proporcionó Newton, es muy dudoso que viera una forma así. Solo la franja central de 2 pulgadas de su espectro de $2^{5}/_{8}$ pulgadas de ancho estaba iluminado uniformemente por la luz del disco del sol. El balance del ancho del espectro consistió en una región de penumbra en que los diferentes colores gradualmente se ensombrecían hacia el negro. Ya que el ojo puede distinguir el rojo mucho más allá en la región de penumbra de lo que puede distinguir el azul, Newton probablemente vio una figura apreciablemente más estrecha y más puntiaguda en el extremo azul que en el rojo.[12] Esta es la forma que describió el más amargo y menos inteligente de los críticos de Newton, Franciscus Linus, y esta es la única de las críticas de Linus a la que Newton nunca respondió.[13] Newton combinó una descripción precisa y detallada de su aparato experimental con una idealización imaginativa de sus resultados experimentales.

El salto de Newton de la total e ininteligible complejidad del fenómeno observable a la idealización geométrica subyacente es síntoma de las extrapolaciones intelectuales que marcan sus contribuciones a la ciencia. Y aparentemente se daba cuenta y le preocupaba la extrapolación, aunque no lo hizo explícito en ninguno de sus comunicados a la Sociedad Real. En las disertaciones ópticas que dio en Cambridge antes de la composición de su primer documento publicado, Newton incluyó una descripción de dos experimentos que había diseñado para investigar la forma del espectro producido sin una región de penumbra. En uno de estos utilizó un lente, colocado a una longitud focal en frente de la pantalla, para reenfocar las imágenes circulares de color de que se componía el espectro. En el segundo utilizó el planeta Venus, en efecto una fuente puntual, en vez del sol para

generar su espectro. Él había justificado su extrapolación ante sí mismo, pero, excepto por referencias implícitas al problema en su correspondencia con Moray y en *Óptica*, no le dijo a sus lectores cómo seguirlo.

El anuncio de Newton en 1672 de los descubrimientos hechos de seis a ocho años antes indujo una gran controversia entre las columnas de las *Philosophical Transactions*.[14] Los colores prismáticos que discutía eran bien conocidos, al menos cualitativamente, y había una amplia convicción entre los ópticos del siglo XVII de que podían ser tratados adecuadamente por las teorías ópticas existentes. No sorprende que haya resentimiento por un novato que aseveraba que el análisis preciso de un efecto bien conocido necesitaba descartar teorías establecidas. Los oponentes podían encontrar fácilmente bases para rechazar las propuestas. Podían, por ejemplo, negar la existencia del efecto experimental. El sol es una fuente de luz móvil y no confiable; el prisma genera varios rayos emergentes, de los que solo uno satisface la descripción de Newton; los resultados cuantitativos varían con el tipo de vidrio empleado en el prisma. De manera alternativa, podían aceptar los resultados experimentales de Newton, pero negar la necesidad o incluso la validez de su interpretación.

La naturaleza y fuentes psicológicas de la controversia eran típicas, pero la reacción fue menos severa de lo que normalmente producía una propuesta tan radical. Los predecesores de Newton habían empleado todos alguna forma de teoría de modificación, pero al no haber llegado a un consenso sobre la naturaleza de la modificación, carecían de una base estable para un contraataque. Y la documentación experimental de Newton sobre su teoría es un clásico por lo simple e incisiva. Los teóricos de la modificación pueden finalmente haber explicado la elongación del espectro, pero, ¿cómo podían haber evadido las implicaciones del *experimentum crucis*? Un innovador en las ciencias nunca había estado en terreno más firme.

Como resultado, la controversia que siguió el anuncio original es de interés particular por cómo revela el carácter de Newton.[15]

En particular la literatura controversial revela la génesis de la relación de Newton con el curador de la Sociedad Real, Robert Hooke, con quien después se enfrascó en una batalla de prioridad por la ley de la inversa del cuadrado de gravitación.[16] El reclamo de Hooke por la autoría de la ley de inversa del cuadrado casi hace que Newton omita el tercer libro de *Principios*, y aparentemente fue la continua oposición de Hooke a las teorías ópticas de Newton lo que causó que Newton retrasara la publicación de *Óptica* hasta mucho después de que su investigación activa en la materia había terminado. Hooke murió en 1703, y *Óptica*, del que gran parte había existido como manuscrito por años, apareció por primera vez al año siguiente.

El primer documento de Newton fue leído a los miembros reunidos de la Sociedad Real el 8 de febrero de 1671/2. El 15 de febrero Hooke entregó, a petición de los miembros de la Sociedad, un reporte y evaluación sobre el trabajo de Newton. Viniendo de un miembro importante de la profesión, un hombre ya establecido como el más original experimentador óptico de la época, el reporte era muy discreto, aunque contenía errores importantes y mostraba la indiferencia típicamente baconiana de Hooke a las formulaciones matemáticas cuantitativas. Hooke alabó y confirmó los resultados experimentales de Newton, y concedió que la teoría que Newton había derivado de ellos era enteramente adecuada para explicar los efectos. Su única crítica importante (exceptuando los comentarios sobre telescopios, ver más adelante) es que la interpretación de Newton no era una consecuencia *necesaria* de los experimentos. Hooke sentía que Newton había realizado muy pocos experimentos para justificar la teoría, que otra teoría (la suya) podía explicar igualmente bien los experimentos de Newton, y que otros experimentos (en particular los suyos sobre los colores de películas delgadas) no podían ser explicados por la teoría de Newton.

La crítica baconiana de Hooke es un índice del dominante énfasis metodológico en la experimentación, un énfasis que hizo el "historial experimental" un producto científico típico de la

época. La mayoría de los miembros de la Sociedad Real habrían estado de acuerdo. Pero Hooke estaba bastante equivocado en pensar que su propia versión de la teoría de modificación podía explicar los resultados de Newton; al menos nunca dio una explicación satisfactoria de la producción de los colores.[17] Por el otro lado, Hooke tenía la razón en que la teoría de Newton no podía explicar algunos de los experimentos en que había basado Hooke su propia teoría. En particular, la teoría de Newton, al año de 1672, no explicaba la difracción o los colores de hojas delgadas de mica, que ambas había explicado Hooke en su *Micrographia* (1665). La teoría de Newton tampoco explicaba los colores producidos al encerrar aire entre hojas de vidrio, una observación que Hooke reportó a la Sociedad el 4 de abril y el 19 de junio en su examen más profundo de la doctrina de Newton.[18] La comunicación última, incidentalmente, incluía una clara descripción del fenómeno usualmente conocido como "anillos de Newton", y parece probable que Newton lo tomó prestado de Hooke y lo empleó para desarrollar una teoría revisada adecuada para manejar los experimentos de Hooke. Newton, en sus largas cartas de diciembre y enero de 1675/6, tuvo éxito en resolver los problemas de Hooke a su propia satisfacción y a la de la mayoría de sus contemporáneos. Pero para hacerlo tuvo que modificar su teoría original por la introducción de un medio etéreo explícito que podía transmitir impulsos como ondas de presión, y este fue un paso inmenso hacia la teoría de Hooke. Hooke, por supuesto, no aceptó siquiera esta última modificación. Siempre sintió que el uso de Newton *tanto de* los corpúsculos *como de* los impulsos de éter violaba la restricción de Occam contra la multiplicación innecesaria de entes conceptuales.[19]

En el análisis final Hooke estaba equivocado. Como Newton claramente mostró en su respuesta retrasada, la teoría de los pulsos de luz de Hooke era incapaz de explicar la propagación linear; tampoco podía la teoría de modificación de Hooke explicar el *experimentum crucis* o cualquiera de los experimentos de mezcla de colores nuevos que Newton aparentemente diseñó

específicamente para satisfacer las objeciones de Hooke. Esta parte de la respuesta era efectiva y Newton bien podía haber comenzado y terminado con la elaboración de estos argumentos, ya que Hooke no había desafiado ni los experimentos de Newton ni lo adecuado de su teoría para resolver los experimentos. Pero esto no fue lo que hizo Newton. En su larga e innecesariamente sarcástica respuesta, cuya incongruencia con la crítica de Hooke no ha sido notada ya que las dos no habían sido impresas juntas antes,[20] Newton atacó a Hooke en tres bases al parecer incompatibles: Hooke había atribuido a Newton una teoría corpuscular que Newton no había desarrollado; la teoría del impulso de Hooke no era básicamente incompatible con la teoría corpuscular (de la que Newton se había deslindado), y la teoría de impulso de Hooke era incapaz de explicar los fenómenos. Newton pudo haber empleado sola cualquiera de estas líneas de ataque –aunque solo la tercera parece a la vez relevante y precisa– pero es difícil ver cómo nada sino pasión ardiente pudo haberlo llevado a emplearlas al mismo tiempo.

Newton era un hombre de pasiones. Es difícil leer muchas de sus respuestas a la crítica sin estar de acuerdo con un juicio reciente de la personalidad de Newton por Lord Keynes. Después de un largo examen de los manuscritos de Newton, Keynes escribió:

> Ya que en términos vulgares modernos Newton era profundamente neurótico de una forma no desconocida, pero –debo decir por los registros– un ejemplo muy extremo. Sus instintos más profundos eran ocultos, esotéricos, semánticos –con un retraimiento profundo del mundo, un miedo paralizante de exponer sus ideas, sus creencias, sus descubrimientos en plena desnudez a la inspección y crítica del mundo. "De los más temerosos, precavidos y sospechosos temperamentos que he conocido", dijo Whiston, su sucesor en la cátedra lucasiana. Los muy bien conocidos conflictos e innobles disputas con Hooke, Flamsteed, Leibnitz, son evidencias muy claras de esto. Como todos los de su tipo, era completamente ajeno a las mujeres. No se separaba de nada y no publicaba nada excepto bajo la presión extrema de amigos.[21]

El miedo de Newton a la exposición y la compulsión relacionada a ser invariable y enteramente inmune a la crítica se

muestran a lo largo de los escritos controversiales. Son aparentes tanto en el tono como en la sustancia de su respuesta a Hooke, donde también se combinan con el inicio de esa tendencia a negar las implicaciones aparentes de escritos anteriores (en vez de defenderlas o admitir un cambio de opinión), lo que ha confundido consistentemente a estudiantes posteriores de su trabajo. ¿Hooke realmente interpretó mal la intención de los comentarios de Newton sobre las dificultades de construir telescopios de refracción? ¿Es honesto Newton al rechazar la hipótesis corpuscular que Hooke le atribuye? O, para tomar un ejemplo posterior y más claro, ¿no es Newton culpable de una mentira motivada de manera irracional en su respuesta a los comentarios de Huygens sobre la composición del color blanco? En su primer documento Newton había dicho, al discutir los colores:

> Pero la más... maravillosa composición es la de la *blancura*... Siempre es compuesta y para su composición son requisito todos los colores primarios mencionados antes, mezclados en una proporción debida... De ahí por tanto ocurre que la *blancura* es el color usual de la *luz*; ya que la luz es un agregado confuso de rayos infundidos con todos tipos de colores... si alguno predomina, la luz se debe inclinar a ese color.

Pero cuando Huygens sugirió que la combinación de amarillo y azul podría generar blanco, Newton admitió la posibilidad pero declaró que nunca había querido decir nada más. Resolvió la aparente contradicción al decir que el blanco de Huygens sería diferente al suyo en virtud de su composición. La posición de Newton era correcta en la respuesta, pero seguramente había cambiado de opinión al alcanzarla.

La misma posición defensiva tuvo consecuencias más serias en los escritos de Newton sobre telescopios. Aquí la influencia de Newton parece haber sido predominantemente negativa. Su propio trabajo en telescopios fue de poca importancia práctica, y sus comentarios sobre diseño frecuentemente eran erróneos. Aunque construyó el primer reflector útil, nunca fue capaz de perfeccionar el modelo suficientemente para permitirle competir con los refractores existentes, y así su posición no era muy diferente de la de

los diseñadores contemporáneos independientes, James Gregory y Guillaume Cassegrain.[22] El telescopio de reflexión permaneció como un juguete curioso en los anaqueles de la Sociedad Real hasta que, en 1722, James Hadley tuvo éxito en tallar un espejo parabólico. Pero tan pronto como el reflector podía competir con el refractor, el diseño de Newton fue descartado para favorecer los diseños de Gregory y Cassegrain que Newton había criticado de manera tan vehemente por razones en esencia irrelevantes.[23]

Mucho más importantes en el desarrollo de los telescopios fueron los errores de Newton en la evaluación de aberraciones ópticas. Al haber sido conducido al telescopio reflector por el descubrimiento de la aberración cromática causada por la variación del índice de refracción con el color, Newton siempre insistió en que la aberración cromática en vez de la esférica imponía la limitación principal en el poder de los telescopios de refracción. Las comparaciones teóricas de Newton de ambos eran correctas matemática y ópticamente, pero, como Huygens señaló en su comentario, la interpretación de Newton de los cálculos era incompatible con el desempeño observado de los lentes esféricos. Newton explicó la discrepancia correctamente como debida al pequeño efecto sobre el ojo de los rayos rojos y azules dispersados ampliamente, pero no notó que en la práctica esto hacía las aberraciones cromáticas de poca o de ninguna importancia comparadas con las esféricas. De manera que Newton continuó insistiendo en la superioridad práctica de los reflectores.[24] La historia subsecuente confirmó el juicio expresado por Huygens en su última carta de la controversia óptica de que hasta que fuera posible tallar espejos no esféricos el futuro de las observaciones telescópicas prácticas estaría asociado con los refractores de larga longitud focal y en consecuencia de aberraciones bajas.[25]

Pero entre los aspectos del pensamiento de Newton que son revelados por el reconocimiento de su aversión a la controversia, el más importante es su actitud hacia las "hipótesis". Como la mayoría de sus contemporáneos, Newton fue guiado a lo largo de su carrera científica por la concepción del universo como

una máquina gigantesca cuyos componentes son corpúsculos microscópicos moviéndose e interactuando de acuerdo con leyes inmutables.[26] La mayor parte del trabajo de Newton en física se puede ver apropiadamente como parte de una campaña consistente para descubrir las leyes matemáticas que gobiernan el agregado y movimiento de los corpúsculos de un "universo de maquinaria" mecánico, y muchos de sus escritos específicamente ópticos, químicos o dinámicos son difíciles de comprender sin referencia a la metafísica corpuscular que jugó un papel activo en su creación.[27] Aun así en la mayoría de sus escritos publicados Newton intentó, nunca con éxito completo, eliminar justamente estos elementos hipotéticos y por tanto controversiales.

En el cuaderno en que registró el progreso de su investigación óptica inicial Newton continuamente se refirió a los rayos de luz como compuestos de "glóbulos" que viajan con velocidades finitas e interactuando en cumplimiento con las leyes de impacto conocidas.[28] Pero en su primer documento publicado Newton omitió toda referencia explícita a mecanismos corpusculares particulares que determinan el comportamiento de la luz. Sustituyó entidades geométricas ("rayos") por entidades físicas (corpúsculos moviéndose en trayectorias definidas), y se contentó con un argumento retrospectivo mostrando que las propiedades de los rayos determinadas experimentalmente deben hacer de la luz una sustancia en vez de una cualidad. En su controversia con Hooke, quien parece haber sabido más sobre las hipótesis de lo que Newton le permitió ingresar en su discusión publicada, renegó incluso sobre este argumento, y así continuó una retirada que había iniciado en su primer documento y que se desarrolló más en sus cartas a Pardies.

Que esta es una genuina retirada de la defensa de hipótesis metafísicas que Newton creía y empleaba creativamente es algo ampliamente, si bien incompletamente, atestiguado por las inconsistencias en sus discusiones y uso de hipótesis a lo largo de los documentos sobre óptica. En el primer documento la luz era una sustancia. En las cartas a Pardies la luz era ya sea una sustancia

o una cualidad, pero la definición de rayos de luz en términos de partes "indefinidamente pequeñas... independientes" hizo a la luz corpórea de nuevo. En la misma carta Newton declaraba que sus observaciones y *teorías* podían ser reconciliadas con las *hipótesis* de presión de Hooke o Descartes, pero en la carta a Hooke demostró forzosamente la deficiencia de todas las hipótesis de presión para explicar los fenómenos de la luz y los colores. Newton negó esta adherencia a la hipótesis corpuscular, y declaró que su aceptación estaba restringida a leyes que podían ser probadas por experimentación, pero volvió al patrón de su cuaderno al emplear implícitamente las dispersiones hipotéticas de corpúsculos en puntos de enfoque para demostrar las desventajas del telescopio gregoriano.[29] En 1672 negó la utilidad de las hipótesis cuando al presentar una teoría que él creía se podía hacer independientemente de ellas, pero al tratar con los colores de películas delgadas en las importantes cartas de 1675/6 empleó hipótesis explícitas, presumiblemente porque el nuevo tema de estas cartas no podría elaborarse de otra forma. Significativamente, fueron justamente estas últimas cartas, de las que grandes segmentos de los libros II y III de *Óptica* fueron transcritos, las que Newton se rehusó a publicar hasta después de la muerte de Hooke. De todos sus escritos ópticos, estas cartas reflejan mejor los procedimientos de Newton en acción.[30]

Gran parte de la ciencia moderna hereda de Newton el admirable objetivo pragmático, del que nunca se ha dado cuenta completamente, de eliminar de los reportes finales del descubrimiento científico toda referencia a las hipótesis más especulativas que jugaron un papel en el proceso de descubrimiento. Lo deseable de este modo newtoniano de presentar teorías está bien ilustrado por la historia subsecuente de las propias hipótesis de Newton. El siguiente gran paso en la óptica, el desarrollo de una teoría ondulatoria adecuada, fue retardado por el dominio de las hipótesis corpusculares de Newton en la mente científica. Pero los comentarios de Newton sobre el papel de las hipótesis en la ciencia fueron dictados por idiosincrasia personal tan a

menudo como por el discernimiento científico; repetidamente renuncia a las hipótesis simplemente para evitar el debate. Y así ha parecido apoyar la aseveración ulterior de que la investigación científica puede y debe restringirse a la búsqueda experimental de regularidad matemática –que las hipótesis que trascienden la evidencia inmediata del experimento no tienen lugar en la ciencia. Un examen cuidadoso de los escritos publicados menos sistemáticos de Newton no proporciona evidencia de que Newton se impusiera a sí mismo una restricción tan drástica sobre la imaginación científica.

Los logros iniciados por la imaginación de Newton no han sido superados, y es primariamente la magnitud de sus logros lo que dirige la atención hacia el hombre. Si el estudio resultante muestra error e idiosincrasia en la compleja y difícil personalidad de Newton, no puede aminorar sus logros sin paralelo. Puede alterar solo nuestra imagen de los requisitos para el logro científico preeminente. Pero esta alteración es una meta que vale la pena perseguir: una imagen cierta del científico exitoso es una condición primera para la comprensión de la ciencia.

N O T A S

1 Por ejemplo, los Experimentos IV y V en la parte III de *Colours* de Boyle son casi idénticos con el primero y último de los tres experimentos que Newton empleó en su primera presentación publicada de la nueva teoría de la luz y el color. En el Experimento IV Boyle genera un espectro y en el V utiliza una lente para invertir el orden de los colores. Pero en la compilación baconiana de Boyle estos no son más que dos entre cientos de puntos experimentales. No existe evidencia de que tuvieran el mínimo efecto en los contemporáneos o sucesores de Boyle. Ver *The Works of the Honourable Robert Boyle*, ed. Thomas Birch (Londres, 1744), vol. 2, p. 42.

2 Las "Cuestiones" que Newton anexó a *Óptica* son la porción de sus trabajos científicos publicados después en los que permitió que apareciera la fecundidad de su imaginación creativa. Estas notas especulativas a su último trabajo técnico proporcionan una visión más íntima de su autor. Por supuesto incluso la *Óptica* en sí misma es un trabajo menos impersonal que *Principios*, pero, a pesar de la frecuente informalidad de estilo literario, los contenidos y organización son los de un tratado.

3 La frase es de Newton.

4 Joseph Priestley, *The History and Present State of Discoveries Relating to Vision, Light, and Colours* (Londres, 1722), pp. 7, 21, 169.

5 La discusión del prisma de Descartes ocurre en Discours VIII de *Les Météores* (1637). Para los experimentos de Boyle ver la nota 1 anterior. Los experimentos de Marci se describen en su *Thaumantias liber de arcu coelesti…* (Praga, 1648) y son discutidos por L. Rosenfeld en *Isis 17*, 325-330 (1932). *Physico-mathesis de lumine* de Grimaldi (Bolonia, 1655) incluye muchas discusiones de experimentos con prismas. La teoría y experimentos de Hooke aparecen en su *Micrographia* (1665), reimpresa por R. T. Gunther como vol. XIII de *Early Science in Oxford* (Oxford, 1938), pp. 47-67. No existe razón para suponer que Newton en 1672 sabía del trabajo de Marci o Grimaldi, pero es un índice del estado de la experimentación óptica en el siglo XVII que Grimaldi, Marci y Boyle habían, entre ellos, realizado los tres experimentos que Newton empleó en su primer documento óptico.

6 Carta de Newton a Oldenburg, secretario de la Sociedad Real, fechada en Cambridge el 18 enero de 1671/2. Thomas Birch, *The History of the Royal Society of London* (Londres, 1757), vol. 3, p. 5.

7 Ver particularmente los diagramas y discusión de Descartes, citados en la nota 5 anterior.

8 En la terminología moderna, las *luces* azul y amarilla son complementarias; es decir, se mezclan para producir blanco. El verde producido cuando *pigmentos* azules y amarillos son mezclados es el resultado de mezcla de color sustractiva, un proceso diferente de la mezcla de colores espectrales. Pero de hecho un azul espectral de longitud de onda larga y

un rojo espectral de longitud de onda corta pueden ser combinados para producir un tinte verde ligero. Al combinar en diferentes proporciones un azul cerca de la región verde del espectro con un rojo cerca del amarillo es posible producir una cantidad de tonos de azul, verde, rojo, amarillo y colores intermedios. Las teorías de dos colores no eran tan ajenas a la experiencia como se había imaginado.

[9] Ignace Gaston Pardies, S. J. (1636-1673), nació en Pau, en el sur de Francia. Al tiempo de su disputa con Newton era profesor de retórica en el Collège Louis-le-grand en París.

[10] Newton presentó primera su nueva teoría en una serie de disertaciones hechas en Cambridge durante 1669. Las disertaciones no fueron impresas hasta 1728, después de su muerte, cuando aparecieron en una traducción al inglés del manuscrito en latín. Una edición en latín que contenía disertaciones de los años 1669, 1670 y 1671 apareció en 1729. Ciertas de las características enfatizadas en la presente discusión emergen con incluso mayor claridad de las disertaciones que del primer documento óptico. Las dos pueden leerse juntas con provecho.

[11] La reconstrucción precedente de la investigación de Newton sigue la narrativa esencialmente autobiográfica proporcionada por Newton en el primero de los documentos ópticos. Puede requerir una modificación importante como resultado de un estudio reciente de los manuscritos de Newton por A. R. Hall, "Sir Isaac Newton's Note-Book, 1661-1665", *Cambridge Historical Journal 9*, 239-250 (1948). Hall cree que Newton descubrió la variación del índice refractivo con el color al observar un haz de dos colores a través de un prisma, y sugiere que el experimento en que un rayo de luz solar pasa a través de un prisma no fue realizado hasta una fecha posterior. Por una variedad de razones (a ser discutidas en otra parte), me parece que esta porción de la reconstrucción de Hall no es plausible. La evidencia textual e histórica disponible, aunque no es decisiva, me convence de que Newton ya había pasado un rayo de luz solar a través de un prisma cuando realizó los experimentos que Hall ha descubierto en el "Note-book".

De ser así, la explicación de Newton sobre el desarrollo de la nueva teoría continúa siendo autobiográfica en el sentido de que el experimento del prisma proporcionó el ímpetu inicial así como una pista importante para la nueva teoría, como se discute antes. Pero, como Hall demuestra de forma conclusiva, la implicación de la explicación de Newton es incorrecta en que Newton no procedió de forma tan directa o tan inmediata del primer experimento del prisma a la versión final de la teoría como implicaría el primer documento. Cuando hizo las anotaciones en su cuaderno del colegio, Newton no había llegado a la forma final de la nueva teoría. Hasta donde puedo decir por los fragmentos reproducidos por Hall, Newton entonces

creía que los diferentes colores eran refractados a través de ángulos diferentes, pero aun sostenía que los colores individuales eran generados dentro del prisma por modificaciones de la luz blanca inicialmente homogénea. Esta etapa intermedia del pensamiento de Newton proporciona un campo fascinante para estudios ulteriores.

[12] Es imposible ser preciso sobre la forma real del espectro vista por Newton. La sensibilidad del ojo humano al azul de longitud de onda corta varía de un individuo a otro, y la intensidad relativa del azul en el espectro también es función de condiciones atmosféricas.

[13] La descripción de Linus aparece a la mitad del primer párrafo de su segunda carta de crítica. Aunque la posición del prisma de Linus era diferente que la del de Newton, el "agudo cono o pirámide" descrito por Linus se debe a los mismos efectos de penumbra que deben haber causado que los lados del espectro de Newton se desviaran del paralelismo.

Franciscus Linus (Francis Hall o Line), S. J., nació en Londres en 1595. Durante su controversia con Newton era maestro de matemática y hebreo en el English College de Liège. Pasó gran parte de sus últimos años de vida intentando reconciliar los resultados de la experimentación del siglo XVII con la física aristotélica. Linus fue el autor de la hipótesis "funículo", por la que decía explicar los resultados de los experimentos del barómetro de Boyle sin recurrir al vacío o a la presión atmosférica, y experimentos diseñados para refutarlo condujeron al descubrimiento de la Ley de Boyle. Linus murió en 1675, a la mitad de la disputa con Newton, pero su causa fue tomada por dos de sus estudiantes, Gascoigne y Lucas.

Anthony Lucas (1633-1693), otro jesuita británico, parece haber sido un experimentador meticuloso. Su incapacidad de obtener la gran dispersión reportada por Newton debe haberse debido a que usó un tipo de vidrio diferente. Las "pruebas" experimentales de Lucas sobre la deficiencia de la teoría de Newton son un índice fascinante de las dificultades de diseñar experimentos de dispersión inequívocos. En la mayoría de los experimentos los efectos son tan pequeños que pueden ajustarse a cualquier teoría, de manera que la documentación incisiva de una teoría particular requiere selección cuidadosa de la multiplicidad de fenómenos disponibles. A primera vista la falla de Newton al responder cualquiera de las críticas experimentales de Lucas parece extraña, particularmente dado que Newton respondió con tal extensión al único comentario de Lucas que no reflexionaba en lo absoluto sobre la validez de las conclusiones de Newton. Pero vea la discusión, más adelante, de la actitud de Newton sobre la controversia.

[14] A. R. Hall, "Sir Isaac Newton's Note-Book", ha señalado que Newton probablemente tenía la intención de escribir "1665" en vez de "1666" para la fecha del experimento prismático que abre su primer documento.

También discute que el trabajo de Newton con el prisma pudo haber empezado en 1664.

15 Existen, sin embargo, muchos puntos de interés técnico en el debate. Estos son discutidos de manera más extensa en L. Rosenfeld, "La théorie des couleurs de Newton et ses adversaires", *Isis 9*, 44-65 (1927). Una relación elemental estimulante de algo del mismo material ha sido proporcionada por M. Roberts y E. R. Thomas, *Newton and the Origin of Colours* (Londres: G. Bell & Sons, 1934).

16 Para bibliografía y una relación definitiva de la controversia de la gravitación, ver A. Koyré, "An Unpublished Letter of Robert Hooke to Isaac Newton", *Isis 43*, 312-337 (1952).

17 La dificultad de adaptar una teoría de presión de onda de la luz como la de Hooke a los diferentes fenómenos de color explorados por Newton está bien ilustrada por la experiencia de Huygens, quien llevó estas teorías a su forma más perfecta del siglo XVII en su *Traité de la lumière* (1690). Huygens escribió a Leibniz que había "dicho nada respecto a los colores en mi *Traité de la lumière*, encontrando este tema muy difícil, y en particular por la gran cantidad de formas distintas en que los colores se producen". Sir David Brewster, *Memoirs of the Life, Writings, and Discoveries of Sir Isaac Newton* (Edinburgo, 1855), vol. 1, p. 95 n.

18 Birch, *History of the Royal Society*, vol. 3, pp. 41 y 54.

19 Ibíd., p. 295.

20 Se sabe que Oldenburg, secretario de la Sociedad Real y editor de las *Philosophical Transactions*, odiaba a Hooke. Esto bien podría explicar su omisión al no haber impreso la crítica de Hooke con la respuesta de Newton. La omisión debe haber parecido un insulto injusto a Hooke, particularmente en vista del tono y sustancia de los comentarios de Newton.

21 J. M. Keynes, "Newton the Man", en *Newton Tercentenary Celebrations* de la Royal Society (Cambridge, 1947), p. 28. Estos documentos, sin embargo, pueden ser utilizados de otra manera. Examine, para una opinión del intercambio Hooke-Newton directamente opuesto al dado arriba, el análisis proporcionado por Brewster, *Memoirs*, vol. 1, pp. 86-92. Pero Brewster no podía evitar proporcionar ilustraciones repetidas de los esfuerzos de Newton por escapar de la controversia (por ejemplo, pp. 95-99).

22 James Gregory (1638-1675), un matemático escocés, describió un telescopio reflector en su *Optica Promota* (1633), y Newton había estudiado el diseño de Gregory cuando inició el suyo. Sieur Guillaume Cassegrain era un modelador y fundidor de estatuas empleado de Louis XIV. Su diseño era seguramente independiente del de Newton y pudo haber sido independiente del de Gregory. Tanto Gregory como Cassegrain intentaron construir reflectores pero fueron incapaces de pulir espejos adecuados.

23 Sobre las contribuciones de Newton al desarrollo de telescopios ver Louis Bell, *The Telescope* (Nueva York, 1922).

[24] El estudio del error más importante y dañino de Newton en sus escritos sobre el telescopio se complica en vez de clarificarse por los documentos de óptica. En *Óptica* (libro I, parte II, experimento 8) Newton "demostró" que es imposible construir un lente acromático, eso es, un lente compuesto de dos o más materiales que difieran de tal forma en sus poderes dispersivos que refracten un rayo de luz blanca sin separar los colores en él. Newton aseguraba haber encontrado por experimentación que cuando un rayo de luz pasaba por una sucesión de prismas de vidrio y agua se generaba un espectro a menos que los rayos emergentes e incidentes fueran paralelos. Concluyó que cualquier combinación de materiales que pudiera corregir la dispersión también nulificaría la refracción, de manera que no era posible una lente acromática. El error puede haber impedido el desarrollo de lentes acromáticas.

Para obtener el resultado experimental Newton debe haber cerrado sus ojos, utilizado azúcar para elevar el índice de refracción de su agua, o empleado una variedad de vidrio con poder dispersivo inusualmente bajo. Las tres explicaciones han sido adelantadas por historiadores posteriores, la mayoría de los cuales también ha expresado sorpresa a la prontitud de Newton para llegar a una conclusión tan general de una evidencia experimental tan leve. Para una relación completa del desarrollo de los lentes acromáticos ver N. V. E. Nordenmark y J. Nordstrom, "Om uppfinningen av den akromatiska och aplanatiska linsen", *Lychnos 4*, 1-52 (1938); *5*, 313-384 (1939). La segunda porción del artículo incluye algunos apéndices y un resumen en inglés.

Es aparente por los documentos de óptica que el teorema de Newton respecto a la relación de la dispersión y el índice de refracción era la mejor refutación posible para tres de sus primeros críticos. Nulificó las objeciones de Hooke y Huygens, quienes habían presionado para que se diera más atención a la perfección de telescopios de refracción, y comprobó que Lucas había errado al reportar la pequeña dispersión de su prisma. Por esta razón la mayoría de los historiadores han argumentado que el teorema desarrollado en *Opticks* estaba en la mente de Newton, al menos implícitamente, desde el inicio de sus investigaciones ópticas y esa es la razón por la que falló en considerar más seriamente los méritos de las posiciones de sus opositores. Pero –y aquí es donde entra la nueva complicación– no puedo encontrar manera de interpretar el texto de la respuesta de Newton a Hooke sin suponer que Newton propone una lente acromática hecha por la composición de una lente de agua con dos lentes de vidrio convexo-cóncavas.

[25] Las cartas para y de Huygens son solo parte de una correspondencia más grande, la mayor parte de la cual no fue publicada hasta hace poco. L. T. More discute la correspondencia completa más ampliamente en su biografía *Isaac Newton* (Nueva York, 1934). Las cartas pueden encontrarse en el

volumen VII de las *Ouevres complètes de Christiaan Huygens* (La Haya, 1888-1944).

[26] M. Boas, "The Establishment of the Mechanical Philosophy", *Osiris 10*, 412-541 (1952).

[27] Para el papel de la metafísica en la química de Newton ver I. Bernard Cohen (ed.), *Isaac Newton's Papers & Letters On Natural Philosophy* (Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1958), parte III. Para su papel en la dinámica de Newton, ver A. Koyré, "The Significance of the Newtonian Synthesis", *Archives internationales d'histoires des sciences 29*, 291-311 (1950), y T. S. Kuhn, *The Copernican Revolution* (Cambridge, Mass., 1957), capítulo 7.

[28] Por ejemplo: "Aunque 2 rayos sean igualmente rápidos, si un rayo es menos que el otro ese rayo tendrá menor efecto en el sensorio ya que tiene menor movimiento que los otros, etcétera.

"De ahí suponiendo que existen partículas sueltas en los poros de un cuerpo con proporción a los rayos más grandes, como 9:12 y los glóbulos menores en proporción a los más grandes de 2:9, el glóbulo más grande al chocar con tal partícula liberará $^{6}/_{7}$ partes de su movimiento, el glóbulo menor liberará $^{6}/_{7}$ partes de su movimiento y el movimiento restante del glóbulo tendrá casi la misma proporción uno al otro como tiene su cantidad, a saber $^{5}/_{7}$:$^{1}/_{7}$::9:1$^{4}/_{5}$ que es casi 2 el glóbulo menor y tal cuerpo pueden producir azules y púrpuras. Pero si las partículas en que los glóbulos se reflejan son iguales al glóbulo menor este perderá su movimiento y el glóbulo más grande perderá $^{2}/_{11}$ partes de su movimiento y tal cuerpo puede ser rojo o amarillo". Hall, "Sir Isaac Newton's Note-Book", p. 248.

[29] Brewster, *Memoirs*, p. 50 n.

[30] Estas cartas críticamente importantes merecen mucho más estudio y discusión del que reciben aquí. Pero tal discusión asume necesariamente la proporción de un análisis crítico del segundo y tercer libro de *Óptica* para los que estas cartas sirvieron de borrador, y el espacio para tal análisis no está disponible aquí. Para una discusión de las ideas centrales en estas últimas cartas, cómo surgen en *Óptica*, ver la introducción de I. B. Cohen a una reedición reciente de *Opticks* (Nueva York, 1952).

Las limitaciones de espacio no me permiten también discutir el diseño de Newton publicado póstumamente de "An instrument for observing the Moon's Distance from the fixed Stars at Sea"("Un instrumento para observar la distancia de la luna de las estrellas fijas en el mar"). Cuando fue escrito este documento contenía importantes novedades de diseño, pero antes de que fuera publicado estas nuevas características habían sido incorporadas independientemente por varios diseñadores en instrumentos de navegación prácticos. Sobre estos instrumentos ver Lloyd Brown, *The Story of Maps* (Boston, 1949), pp. 191 y ss.

El desarrollo de la teoría del color de Newton

Richard S. Westfall[1]

Westfall, ISIS, "Newton's "The Development of Newton's Theory of Color" 53:3 (1962) pp. 339 to 358. © **University of Chicago Press**.

"Para llevar a cabo la última promesa que le hice, debo informarle sin mayor ceremonia que en el inicio del año 1666 (en el cual me dediqué a pulir cristales ópticos de formas diferentes a la esférica) fabriqué un prisma triangular para intentar con él los celebrados fenómenos de los colores".[2] Así fue como Isaac Newton, en la introducción de su primer documento sobre la luz, se presentó al mundo científico de sus días. Si esas palabras como introducción nos conducen a ver hacia adelante, no solo su trabajo en la óptica sino también su carrera completa que al final lo tendría entronizado como monarca reinante en la ciencia británica, también nos conducen a mirar hacia atrás a una larga tradición de investigación y especulación óptica. Los fenómenos de los colores fueron, como Newton dijo, celebrados. Cuando oscureció su cuarto para reproducir un espectro en la pared opuesta a la ventana, sin embargo, no estaba, como podrían implicar las palabras, repitiendo un experimento establecido en la tradición óptica. El experimento de Newton era distinto deliberadamente en factores cruciales de cualquier tradición que se le presentó. De hecho estaba diseñado para desechar la doctrina recibida de los colores que la tradición, trazando su descenso un par de miles de años, le había entregado. La planeación de su experimento, no sus resultados observados, constituyeron la revolución en la teoría de los colores.

La filosofía mecanicista establecida como cimiento de la ciencia del siglo XVII por Descartes estableció el contexto de la investigación de Newton y proporcionó el complejo inmediato de ideas que su trabajo en óptica revolvió. Los fenómenos de la luz y los colores habían adquirido nuevo significado a los ojos de Descartes y de aquellos que lo siguieron, quienes vieron en la filosofía mecanicista la llave de los acertijos de la naturaleza. Cuando Descartes argumentaba que la luz distingue los tres elementos básicos u órdenes de corpúsculos de los que se componen

res extensae, de manera que los cuerpos son luminosos, transparentes u opacos, no podía no estar interesado en la óptica.[3] Los fenómenos de los colores, además, tomaron una importancia mayor en su ataque a las cualidades reales aristotélicas. Si decimos que vemos color en un cuerpo, decía Descartes, es lo mismo que decir que vemos algo pero estamos en ignorancia absoluta sobre su naturaleza. Somos completamente incapaces de concebir lo que podría ser una realidad que existe fuera de nuestras mentes. Podemos tener un conocimiento claro y distinto de los colores solo cuando los consideramos como sensaciones. Si pensamos que percibimos color en un objeto, erramos en igualar la sensación que experimentamos con algo que suponemos que está en el objeto.[4] Las sensaciones de color, como otras sensaciones, son meramente movimientos locales en nuestros nervios producidos por movimientos locales en el mundo exterior. Descartes objetó a una distinción hecha por algunos filósofos escolásticos entre los colores "reales" de los cuerpos y los colores "aparentes" del arco iris. Ya que aparecer es la naturaleza de los colores, no se pueden sacar conclusiones válidas entre las fuentes de las sensaciones de color. De los movimientos locales que excitan sensaciones y de las formas y tamaños de los cuerpos movidos podemos formarnos ideas claras y distintas. No podemos comprender sabiamente cómo las cualidades reales tales como el color, que se supone existen en los cuerpos, pueden causar movimientos locales en nuestros nervios. El color se convirtió virtualmente en el caso de prueba de la metafísica cartesiana aplicada a las cualidades. Cuando Robert Boyle –quien en realidad no era cartesiano excepto a este respecto– empezó a publicar las historias de cualidades por las que pretendía apoyar la filosofía mecánica, su *History of Colours* fue uno de los primeros en la serie. También los colores parecían tener importancia primaria para la filosofía mecánica de Robert Hooke.

Siendo un veterano artesano de modelos mecánicos verbales, Descartes empleó tres analogías mecánicas en su tratamiento de la luz. Las tres concuerdan poco excepto en su naturaleza me-

cánica. Primero explicó la luz como una presión transmitida de manera instantánea a través de la materia. Como la vara con la que un ciego "ve" obstáculos en su camino, la materia de cuerpos transparentes transmite un impulso que produce una sensación en el ojo. Segundo, el impulso que llamamos luz es como la tendencia del jugo en un barril de uvas (nuestro filósofo mecánico saborea aquí una gota de lo orgánico) a fluir por un agujero en el fondo mientras que las uvas permanecen estacionarias. En el tercer ejemplo la presión cede por complete al movimiento, y la luz se compara a una bola en movimiento.[5] Para explicar las leyes de reflexión y refracción, Descartes se apoyó en su tercera analogía, de ella pudo derivar por primera vez (en un libro) la ley de los senos para la refracción. De manera parecida el color era explicado por la tercera figura. Algunas superficies matan el movimiento de las partículas de la luz, como la arena destruye el movimiento de una bola que cae sobre ella. Tales superficies aparecen negras. Otras, que las reflejan sin alterar nada excepto la dirección, aparecen blancas. Otras más le dan a las partículas un movimiento giratorio como el de una bola de tenis golpeada de forma cortante; tales movimientos giratorios producen las sensaciones de color.

En la *Dióptrica*, Descartes no intentó explicar el color de manera más completa; la teoría del arco iris en *Meteoros* requería que lo hiciera. Si su explicación del arco iris fuese válida, los colores deben producirse por refracción –por una refracción única que no sea revertida por una segunda. Cuando un rayo que ha sido refractado una vez es limitado por la oscuridad o la sombra, se producen colores. Los corpúsculos en el borde del rayo se encuentran confinados entre partículas quietas de un lado y partículas en movimiento del otro. Las presiones combinadas operan para cambiar su velocidad de rotación. Si las partículas quietas se encuentran del lado hacia el que se refracta el rayo, las partículas de la luz "no giran tan rápido ya que se mueven de forma rectilínea" y resulta el azul. Del lado opuesto del rayo, tensiones contrarias hacen que las partículas "giren con más

fuerza como para moverse en forma rectilínea" y aparece el rojo.[6] Cuando los corpúsculos giran con una velocidad igual a su velocidad hacia delante (de la que Descartes parece referirse al movimiento de una bola giratoria), la luz produce la sensación del blanco. Al aumentar la velocidad de rotación aparecen colores que tienden al extremo rojo del espectro; al disminuir, colores hacia el extremo azul. Todas las sensaciones de color se pueden referir a una fuente común; un movimiento sencillo de rotación. Ya que Descartes decía que las superficies que reflejan la luz pueden impartir rotaciones similares, consideró a la refracción no como la causa de los colores, sino como un caso simplificado que permitía análisis.[7]

La luz que pasa por un medio refractante normalmente pasa por dos refracciones, una en cada una de sus superficies; si las superficies son paralelas, como en una placa de cristal, la segunda refracción, en opinión de Descartes, revierte la primera y destruye su efecto. Su problema era aislar una sola refracción, y el prisma con una cara colocada perpendicular al rayo incidente permitía hacerlo.[8] Aunque la apariencia del espectro prismático se había conocido al menos desde los tiempos de Séneca y había sido una cita común en tratados medievales, Descartes estableció su papel en la óptica del siglo XVII cuando vio en el prisma el instrumento ideal para establecer su teoría. Al diseñar su experimento, tenía un punto que demostrar –que una refracción sencilla genera colores. Los detalles del experimento derivaron naturalmente de su propósito. El prisma tendría que ser móvil de manera que su cara pudiera ser colocada perpendicular a los rayos del sol. Sería conveniente que la pantalla que recibiría la imagen fuera movible con el prisma. Descartes colocó el prisma en un tablero que se sostuvo más o menos horizontal. Un agujero en el tablero permitió que pasara un rayo pequeño. Un segundo tablero, unido perpendicularmente al primero y por tanto aproximadamente vertical, sirvió como pantalla para recibir la imagen. El espectro de Descartes tuvo entonces una trayectoria de tan solo unas cuantas pulgadas en que esparcirse. Ya que fue interceptado por

una pantalla que lo cortó a un ángulo de aproximadamente 45°, se oscureció la posibilidad de observar dispersión. El ángulo refractante relativamente pequeño del prisma (30° a 40°) –sin duda elegido por su conveniencia en este arreglo– oscureció aun más la posibilidad.[9] Por todo eso, el diagrama de Descartes claramente muestra los rayos del espectro divergiendo. Sin embargo divergen al ángulo de convergencia del rayo incidente del sol. El diagrama muestra los rayos a un lado del haz incidente de un borde del sol y los del otro lado del otro borde. Si su intención era que la dispersión del lápiz refractado de rayos difiriera de los 31' del lápiz incidente, el hombre que recién había anunciado la ley de los senos tenía una explicación obvia a la mano.

Al formular su teoría de los colores Descartes jugó al rebelde conscientemente, exponiendo la doctrina peripatética de las cualidades y colores con el fin de sustituir una explicación mecánica. Poco comprendía el rebelde cuán ajustadas estaban las ataduras de la tradición que lo confinaban. Incluso en su rechazo a la doctrina peripatética aceptó, sin cuestionar y al parecer sin percibirlo, algunas suposiciones básicas respecto a los colores. Empleadas a lo largo de las investigaciones escolásticas del arco iris, estas suposiciones tenían ancestros que podían trazarse más allá de Aristóteles a etapas más primitivas de la filosofía griega.

Aristóteles había adoptado la teoría de Anaxímenes para explicar los colores del arco iris. Sostenía que los colores aparecen cuando la luz del sol se mezcla con la oscuridad de una nube. El tratamiento del arco iris de Aristóteles parece tener un conflicto con sus otras discusiones acerca de la luz y el color. Mientras que en *De Anima* consideraba que la luz es la actividad instantánea de medios transparentes y los colores las superficies terminantes de los cuerpos visibles, en *Meteorologica* trató a la luz como una sustancia modificada en colores por el medio a través del cual pasa.[10] La aparente incompatibilidad de las dos posturas dio pie a las discusiones entre los escolásticos sobre la realidad de los colores del arco iris. Uno de los problemas establecidos por Descartes para la óptica del siglo XVII –resuelto triunfalmente por Newton–

fue encontrar una sola explicación para todos los fenómenos del color. Sin embargo este problema no afecta materialmente a la concepción de los colores de Aristóteles, que en cualquier caso los considera mezclas de compuestos.[11] La suposición fundamental de esta concepción de los colores, explicada desde el punto de vista de *Meteorologica*, sostiene que los colores son modificaciones de la luz pura. Una segunda suposición iguala la fuerza con la brillantez. Entonces el rojo se considera la aproximación más cercana al blanco –producido cuando luz fuerte es modificada por un medio oscuro o reflejado desde una superficie oscura. Al declinar la fuerza de la luz y aumentar la mezcla de oscuridad, primero aparece el verde y finalmente el violeta, oscuro, débil, y el último paso antes de la negrura. Estos tres colores sostenía Aristóteles que eran primarios, los otros colores producidos por la composición de los tres componentes de la oscuridad y la luz. De acuerdo con su tratamiento general de las cualidades, el concepto de los colores de Aristóteles se basa en una tercera noción fundamental –a saber, que todos los colores caen en una escala entre los extremos contrarios de negro y blanco.[12]

La óptica medieval pronto se movió más allá de la comprensión aristotélica del arco iris. Pero si comprendía la producción del arco de una manera diferente, no retaba su doctrina de los colores. La aparente manifestación del sentido común, parecía que no invitaba al cuestionamiento ni requería alteración. Grosseteste, por ejemplo, definió el color como luz mezclada con un medio transparente (*lumen admixtum cum diaphano*).[13] Los medios pueden variar en pureza, y la luz en brillantez y densidad; de las varias combinaciones de las tres variables surgen los diferentes colores. Aunque Albertus Magnus no aceptó toda la teoría de Grosseteste de la formación del arco iris, su concepto de los colores repetía las ideas aristotélicas fundamentales.[14] Una vez más Witelo alteró los componentes de la teoría del arco iris sin cambiar las ideas fundamentales sobre el color.[15] La teoría del color defendida por Teodorico de Friburgo descansaba en la misma concepción, es decir, debilitamiento por medio de la refracción que permite la

mezcla de una cantidad de oscuridad del medio.[16] Una de las últimas repeticiones de la teoría de modificación apareció en las lecciones ópticas del propio maestro de Newton, Isaac Barrow. Los cuerpos blancos son aquellos que reflejan la luz copiosamente hacia todos lados, los negros aquellos que virtualmente no reflejan luz. Los cuerpos rojos reflejan un poco menos que los cuerpos blancos, los azules un poco más que el negro. Todos los otros colores son mezclas de rojo y azul.[17] Aunque Aristóteles había mantenido la existencia de tres colores primarios, y Teodorico de cuatro, la aseveración de Barrow revela claramente el dualismo inextirpable en una concepción que consideraba que todos los colores son modificaciones de la luz pura por la mezcla de oscuridad. Ya que la doctrina consideraba los colores en términos de una escala ubicada entre los extremos opuestos de la luz (o blanco) y la oscuridad (o negro), de los cuales ninguno se puede medir objetivamente, era inherentemente incapaz de ser tratada matemáticamente.

Descartes también aceptaba el concepto aristotélico del color. La noción de colores fuertes y débiles se traducía en un modelo mecánico "claro y distinto" con tan fatal facilidad que Descartes no pudo siquiera percibir lo que estaba haciendo. La fuerza del rojo ahora tenía un equivalente mecánico, es cierto, la alta velocidad angular de las partículas de la luz, y la debilidad del azul se refería a la baja velocidad angular. Pero los colores seguían siendo categorizados en una escala entre extremos tan indeterminados como el negro y blanco de Aristóteles –en todo caso, de manera más indeterminada, ya que eran velocidades imaginarias de partículas inobservables. Quizá nada revele la sumisión de Descartes a la tradición peripatética de manera más clara que su tratamiento del púrpura. A su ojo el púrpura revelaba una chispa de vivacidad y radiancia, un toque de *encarnado*, que era completamente incompatible con la lánguida rotación de los corpúsculos azules. El púrpura aparece, decidió él, cuando la combinación de fuerzas que trabajan para alentar las partículas productoras de azul provoca que algunas de ellas se volteen.

Como las manecillas de un reloj parecerían a un observador a su espalda moverse en sentido contrario, ahora el movimiento inicial giratorio de la partícula sería efectivamente revertido en relación con sus vecinas, y las fuerzas que antes trabajaban para retardarla se convertirían en aceleradores. De ahí la vivacidad del púrpura del lado de los azules mate.[18] El concepto del color de Descartes reveló su concordancia con Aristóteles en especial en su confianza en la idea de modificación. Quizá no sea del todo imaginario ver, en la condición de Descartes, que el rayo refractado debía ser terminado por un medio oscuro quieto, otra faceta de su herencia aristotélica.

El trabajo de Descartes en la óptica ejerció un dominio peculiar sobre las mentes de los investigadores en la generación siguiente. Por un lado, las deficiencias de su modelo mecánico eran obvias. Hooke necesitó solamente dos páginas para desmantelarlo por completo, y de hecho ningún investigador de óptica relevante la aceptó. Por otro lado, la visión de una explicación mecánica de los colores solamente tenía que mencionarse para convertirse en el tema de cada discusión importante. Aquellos que destrozaron el modelo cartesiano procedieron sin demora a construir uno propio. Y el concepto básico de la modificación permaneció sin cuestionarse en la era mecánica como lo había sido en la peripatética.

Marcus Marci, escritor sobre la óptica y el arco iris a mediados del siglo XVII que alguna vez fue citado como precursor de Newton, sostenía que los colores se originan en la refracción de la luz por un prisma. "La luz no cambia (*mutatur*) a colores excepto por una cierta refracción en un medio denso, y las diversas especies de colores son productos (*partus*) de refracciones".[19]

Un investigador más importante, Grimaldi, lanzó un ataque más articulado a los conceptos aristotélicos de la luz y el color que el que había hecho Descartes. La luz, sostenía Grimaldi, es un fluido sustancial propagado a una velocidad inmensa, aunque no infinita; las sensaciones de colores son excitadas por vibraciones en el fluido. Como Descartes había hecho también, Grimaldi

rechazó la doctrina aristotélica de los colores reales, y uno de los objetivos primarios de su investigación fue destruir cualquier distinción entre colores reales y aparentes. Los colores son solo modificaciones de la luz. Por varios experimentos buscó demostrar cómo la reflexión, refracción y difracción (que él descubrió) pueden modificar la luz tanto como para producir sensaciones de color. Cuando Grimaldi proyectó un espectro prismático, también tenía en mente objetivos definidos. Ya había demostrado cómo una simple reflexión puede generar colores. Ahora probaría que una refracción sencilla podía hacer lo mismo. En vez de un tablero con un agujero, Grimaldi oscureció una cara de su prisma dejando solo un pequeño punto sin cubrir. En una pantalla recibió el espectro colorido; claramente la simple refracción produce colores. Grimaldi además vio cómo el experimento prismático podía ser analizado para revelar cuál es la naturaleza de la modificación. Notó explícitamente la divergencia del rayo refractado. Como el diagrama de Descartes había sugerido los fenómenos, también sugería la explicación, y Grimaldi estaba muy versado en óptica como para no verlo. El diámetro aparente del sol significa que los rayos del haz incidente no son paralelos, y la ley de los senos explica la divergencia del haz refractado. Los fenómenos son, de hecho, necesarios. Ciertamente Grimaldi no consideró que requería medición cuidadosa para su confirmación. Pero la ley de los senos sugirió una consecuencia posterior. Al considerar tres rayos en el haz incidente, los rayos en ambos bordes y el bisector del ángulo incluido, Grimaldi calculó sus refracciones y concluyó que el rayo medio no se bisecta más en el haz refractado. Emerge más cerca de un borde. Dado que los rayos incidentes a un lado del rayo medio aun están incluidos entre ese rayo y el borde, el haz refractado está más concentrado de un lado que de otro. Las densidades desiguales, argumentaba él, introducen tensiones como si ocurrieran dentro del haz de luz, modificando las vibraciones que producen sensaciones de color. Sobre qué lado del haz aparece rojo, la tradición ofrecía una explicación obvia: "Por tanto, el color rojo aparece en ese lugar donde la

luz es más intensa o densa, azul en el lugar donde la luz es más difusa y extendida; ni se puede dudar que el rojo es más lúcido y alegre que el azul..."[20]

De manera más clara que el trabajo de Grimaldi, la investigación del color de Robert Boyle revela la importancia de la teoría óptica para la filosofía mecánica. Su *Historia experimental de los colores* irradia bastante influencia cartesiana.[21] Empleando la tercera figura de Descartes y reflejando su discusión del color, Boyle habla de "los inimaginablemente sutiles corpúsculos que forman los rayos de luz..."[22]El trabajo es abundante en referencia a "principios inteligibles y mecánicos" por los que pretende explicar los colores, "no como las escuelas por cualidades del aire, sino por cuerpos reales, aunque extremadamente menudos..."[23] Necesariamente su argumento niega explícitamente una distinción entre colores reales y aparentes. Los colores son simplemente sensaciones estimuladas en los nervios ópticos por ciertos movimientos locales. Por la refracción, así como por la reflexión de superficies opacas, la luz puede ser modificada de tal manera que provoca una sensación dada. Decir que un cuerpo tiene color es tan solo decir que el arreglo mecánico de las partículas en su superficie es tal que modifica la luz, al reflejarla, de cierta manera. Como el resto de su generación, Boyle se rehusó a aceptar el modelo mecánico cartesiano. En contraste con algunos de ellos, se abstuvo de construir otro, reservándose un juicio final hasta que se mostrara toda la evidencia.[24] En un punto, sin embargo, al parecer no había razón alguna para dudar; cuando se refirió a la "luz modificada, llamada color...", una frase que repite el punto de vista de todo el trabajo, estaba aceptando sin cuestionar la tradición la tradición del sentido común transmitida por la escuela aristotélica.[25]

El legado filosófico de Descartes se había convertido en propiedad común de todos aquellos ocupados con la óptica y los colores. Los intereses peculiares de Boyle y su deleite baconiano normal en los fenómenos como tales ayudaron a determinar las lí-

neas en que explotó su herencia. Como químico estaba interesado principalmente en los cambios en la composición de sustancias. La mayor parte de *Historia experimental de los colores* está dedicada a observaciones que relacionan cambios de color con cambios en el arreglo mecánico de las partes. Cuando trató con colores "enfáticos" producidos por un prisma, no estaba simplificando conscientemente los fenómenos del color a su ejemplo más claro, simplemente agregaba, como una hormiga, otro grano al creciente montón de evidencia experimental. Boyle estaba interesado en los colores, cualquier color. Colocó el prisma de manera que el rayo incidente cayera directamente en un ángulo y era así como si se dividiera en dos, de los que cada mitad era refractada por una cara diferente del prisma. Por una combinación de refracciones y reflexiones internas emergieron cuatro iris y cuatro imágenes incoloras. Los ojos de Boyle parecen brillar con deleite –¡aquí estaban los colores! Lejos de desear simplificar el experimento para tratar con un solo espectro, estaba más deseoso por una versión que produjera ocho iris. Es cierto que Boyle modificó el experimento en un punto cubriendo la cara del prisma excepto por un pequeño agujero, reduciendo así el "iris prismático a un compás muy estrecho..." Al pequeño iris así formado lo examinó con un microscopio –para anunciar que los colores eran aparentes incluso en la escala microscópica. El propósito de Boyle en el experimento prismático era demostrar que los colores "enfáticos" no son menos reales, y de hecho no distintos, que otros colores. Reflejar y refractar más la imagen, registró él, no causó que el iris perdiera sus colores. En una ocasión reflejó el iris a un foco con un espejo cóncavo. En otra ocasión lo refractó con un espejo ustorio doble convexo de manera que "una parte del iris se pueda hacer aparecer ya sea más allá o de este lado de las otras partes del mismo iris; pero aun así los mismos colores vívidos aparecían en la parte desplazada (si puedo llamarla así) como en la otra".[26] Estos experimentos se parecen mucho a algunos de los de Newton. Cuánto se parecen –y qué profundo el abismo que aun había

que cruzar. Quizá fue coincidencia que no pudiera en ninguno de los experimentos llevar el iris a su foco verdadero, pero no fue accidente que no pudiera apreciar el hecho de la refracción diferencial esparcida directamente ante él. Los experimentos de Boyle se realizaron dentro de un marco de ideas que gobernaba la evidencia que buscaba. Su uso de la palabra "iris" para indicar la imagen colorida es indicador de sus conceptos. No mencionó la divergencia del rayo refractado, y la trayectoria aparentemente corta (menciona haber usado el piso para recibir la imagen) no le dio espacio para que se hiciera manifiesto. Boyle estaba interesado solo en demostrar la realidad de los colores prismáticos –"realidad" significando virtualmente "durabilidad" en este caso– y su experimentación fue planeada con eso en mente. En la página siguiente procedió a examinar cómo los papeles coloridos aparecían a la luz de las velas. Toda la *Historia experimental de los colores* es un estudio fascinante en futilidad baconiana. Solo cuando su amada acumulación de hechos fue reemplazada por un plan sistemático de experimentación inspirado por una nueva idea se resolvió el acertijo del color.

En el mismo periodo de unos cuantos años durante los que Boyle estuvo completando su *Historia experimental de los colores* y Newton iniciaba su carrera en óptica experimental, Robert Hooke también investigaba los colores. Aunque Hooke presentó una crítica breve y devastadora de la teoría cartesiana de los colores en su *Micrographia*, estaba completamente bajo el dominio de la visión cartesiana de la naturaleza.[27] En el prefacio había proclamado lo que el microscopio podía lograr –que podía aumentar el conocimiento mecánico al permitir a los hombres "discernir todos los trabajos secretos de la naturaleza, casi de la misma manera en que hacemos con las que son producciones de arte, y son manejadas por ruedas y motores y resortes, que fueron desarrollados por el genio humano".[28] El mismo genio mecánico que sacó las deficiencias del modelo cartesiano de forma tan aguda no le permitió detenerse en destrucción. En su trabajo óptico al menos, Hooke parece estar impulsado por una compulsión

de traducir ideas a imágenes representables palpables. Parece incapaz de hacerlo de otra manera. La evidencia más débil lo pone a trabajar construyendo un modelo. Como en el caso de Descartes, su experimentación con los colores estaba guiada por ese fin. "Debe haber por tanto otra propiedad de la refracción que causa color", concluyó la crítica de Descartes. "Y al examinar la cosa, no puedo concebir ninguna más general, inseparable y suficiente que esa que le he asignado antes".[29]

Descartes había atinado con el prisma como un medio para aislar una refracción sencilla. Aunque las observaciones de Hooke en placas delgadas refutaban explícitamente la aseveración de Descartes de que las refracciones en dos superficies paralelas en una placa se cancelaban una a la otra, vio la ventaja del espectro prismático para su análisis. En realidad Hooke no empleó el prisma en este punto, pero obtuvo un resultado idéntico por un medio que Grimaldi también había utilizado a veces. Refractó un haz en la superficie de un contenedor de agua profundo y recibió la imagen en el fondo. Hooke ya había manifestado su concepto de la luz: es un movimiento vibratorio sutil transmitido por medios susceptibles a tales vibraciones. Ya que la velocidad de la luz varía en medios diferentes, la refracción transmite el frente del pulso oblicuo a la dirección del haz, y la oblicuidad provoca sensaciones de color. El experimento de Hooke con el espectro fue realizado para demostrar esta teoría. Su diagrama del experimento muestra el rayo refractado divergiendo, con los rayos de cada borde llegando, por supuesto, de los dos lados del sol. Se confirmó en este punto de vista cuando miró al sol a través del fondo de un matraz y vio uno de sus bordes color rojo y el otro azul.[30] De acuerdo con la explicación de Hooke, el ángulo de adelante de los pulsos oblicuos es "muerto" por la resistencia del medio oscuro que limita con el rayo (¡de nuevo el papel de la oscuridad en la modificación de la luz!). Entre más se aleje el pulso de la superficie refractante, mayor "mortandad" penetra el rayo, y el perfil del haz refractado revela una región muerta triangular –inevitablemente azul– con su ápice en la superficie

refractante. Del lado opuesto del haz, mientras tanto, el borde siguiente, con su camino preparado por el golpeado ángulo principal, se hace más fuerte y propaga un movimiento en el medio quieto adyacente. Por ello se encuentra un área triangular roja y fuerte del otro lado del rayo. Hooke estaba convencido de que solo hay dos colores primarios. "El azul es una impresión en la retina de un pulso de luz oblicuo y confuso, cuya parte más débil precede, y sigue la parte más fuerte". "El rojo es una impresión en la retina de un pulso de luz oblicuo y confuso, cuya parte más fuerte precede, y que sigue la parte más débil".[31] Otros colores son compuestos de estos dos. Así, en donde las dos áreas triangulares en el rayo refractado empiezan a traslaparse aparece el verde. La explicación de Hooke del espectro sugirió un medio de confirmación al variar la distancia de la pantalla. Desafortunadamente su uso de una superficie de agua en vez de un prisma impuso una inflexibilidad considerable. Aumentar la distancia habría sido especialmente difícil, él usaba un vaso de precipitados de dos pies de profundidad. Pero al parecer Hooke no sintió necesidad de llevar la investigación más allá, para él el experimento había cumplido con su propósito.

Quedó a Isaac Newton contender con el concepto tradicional de modificación. La más temprana de sus consideraciones de la luz y el color de la que sabemos está registrada en uno de sus cuadernos.[32] En ese tiempo Newton hizo las anotaciones de que había leído *Dióptrica* de Descartes y casi por seguro también su *Meteoros*. Había leído *Historia experimental de los colores* de Boyle, cuya influencia es perceptible casi desde las primeras notas y citas que de él aparecen frecuentemente. Las notas reflejan el estado de la opinión sobre los colores perfectamente en ese punto. Contienen una breve refutación del concepto de la luz de Descartes, en la que Newton expuso las dificultades inherentes de un concepto de la luz como presión. Mientras tanto la influencia cartesiana continuó dominando su enfoque hacia los colores, como revela su primera discusión de ellos.

De los colores.

De que los colores oscuros parecen más lejanos que los ligeros puede ser de ahí que los rayos pierden una poca de su fuerza al reflejarse en un cuerpo blanco porque son resistidos poderosamente por él pero un cuerpo oscuro por razón de la soltura de sus partes da admisión a la luz y la refleja pero débilmente y así la reflexión de la blancura estará más pronto en el ojo. O porque el blanco envía rayos con más fuerza al ojo y le da un impacto más fuerte.[33]

Como el pasaje indica, Newton, como Grimaldi, como Boyle y como Hooke, estaba buscando una explicación mecánica de los colores –una explicación mecánica como Descartes había requerido, pero una explicación mecánica satisfactoria, como Descartes no había proporcionado. Otra cosa que el pasaje sugiere, y que pasajes posteriores sugieren con más fuerza, es que Newton insistiría en la aplicación rigurosa de principios mecánicos. ¡Qué cantidad de mecanización pobremente desarrollada había sido generada en el nombre de la ciencia, fricciones imaginarias produciendo rotaciones imaginarias, oblicuidades imaginarias imaginativamente cortadas! La característica novedosa de la discusión de Newton es la aplicación seria de los principios de la mecánica en una escala microscópica. En vez de construir modelos imaginarios, por ejemplo, él sugirió que los colores pueden aparecer en prismas porque algunos rayos, moviéndose más lentamente que otros, se refractan a un ángulo mayor. La sugerencia se puede extender más allá de los colores prismáticos para explicar los colores de cuerpos.

Por esta razón el rojo, amarillo, etcétera, se forman en los cuerpos deteniendo los rayos de movimiento lento sin obstruir mucho el movimiento de los rayos más veloces. Y el azul, verde y morado por disminuir el movimiento de los rayos más veloces y no de los más lentos. O en algunos cuerpos todos estos colores pueden surgir por la disminución del movimiento de todos los rayos en proporción geométrica mayor o menor, de ahí habrá menos diferencia en sus movimientos que de otra forma.[34]

Unas cuantas líneas después intentó otra hipótesis. Suponiendo que los rayos tienen velocidad igual pero sus partículas

de tamaño desigual, concluyó que llegarían al ojo con diferentes impactos.

> De ahí suponiendo que hay partículas sueltas en los poros de un cuerpo en proporción a los rayos más grandes, como 9:12: y el glóbulo menor está en proporción al más grande de 2:9. El glóbulo más grande al chocar con tal partícula perderá 6/7 partes de su movimiento, el glóbulo menor perderá 2/7 partes de su movimiento y el movimiento restante del glóbulo tendrá casi tal proporción del uno al otro como tengan sus cantidades. A saber 5/7:1/7::9.1 4/5, que es casi 2 el glóbulo menor. Y tal cuerpo puede producir azules y morados. Pero si las partículas en que los glóbulos se reflejan son iguales a los glóbulos menores perderá su movimiento y el glóbulo más grande perderá 2/11 partes de su movimiento y tal cuerpo puede ser rojo o amarillo.[35]

Mientras buscaba una explicación mecánica del color, Newton había sido llevado por su propio genio mecánico a sustituir una nueva suposición en la discusión. El primero de sus pasos en óptica, como el cuaderno revela, lo vio romper con el concepto de modificación para intentar, aunque tentativamente, el análisis. Esto es, consideró la idea de que la luz blanca puede ser una mezcla de la que los colores individuales se separan. En este discernimiento estaba contenido, como se demostró finalmente, todo su trabajo en óptica.

Newton no dijo una palabra sobre lo que sugirió la idea. Sin embargo, el tenor de toda su carrera científica impregna el cuaderno de forma tan definitiva que parece razonable la conjetura. La preferencia instintiva por el tratamiento cuantitativo y la insistencia en el rigor matemático, donde la imaginación sin restricciones en la construcción de modelos había tenido una fuerte influencia, parece haber incitado la sugerencia en los cuadernos. Se exigían explicaciones mecánicas. Muy bien, que se empleen principios mecánicos en vez de falsedades vacías en la forma de máquinas imaginarias. ¿Se refractarían igualmente un rayo lento y uno rápido por una fuerza refractante constante? ¿Rebotarían un corpúsculo pequeño y uno grande con igual fuerza de partículas del mismo tamaño? El obvio paralelismo entre el concepto final del color de Newton y el principio de inercia, sugiriendo

la aplicación de la mecánica al color, hace esta conjetura más plausible. En una palabra, la nueva idea que empleó aparece de la mano con tratamientos mecánico y matemático más rigurosos.

Cualquiera que fuera la causa, Newton había dado con una nueva idea. Como tal era solo una idea. La trató como una hipótesis tentativa a la cual no se había comprometido; los ejemplos citados antes lo muestran intentando una combinación de análisis y modificación. Intentó aplicar la idea a la explicación de las franjas de colores alrededor de los cuerpos vistos a través de un prisma. Conjeturalmente colocó dos rectángulos lado a lado (abcd y cdsr) y en ambos designó las áreas de las franjas enseguida del borde común (eodc en el rectángulo abcd, y cdqp en cdsr). Intentó compilar un diagrama de las franjas coloridas cuando varios pares de colores, generalmente pares de luz contrastante y colores oscuros, se colocan en abcd y cdsr. Siguió una explicación:

> 1. Note que los rayos que se mueven lento se refractan más que los rápidos. Segundo. Si abdc es sombra y cdsr blanco entonces los rayos de movimiento lento que vienen de cdqp serán refractados como si hubieran venido de eodc de manera que el rayo de movimiento lento se separa de los rápidos por refracción, de ahí surgen dos tipos de colores, a saber: de los lentos azul, el color del cielo, y morados. De los rápidos rojo y amarillo y de los que no se mueven muy rápido ni lento surge el verde, pero de los rayos movidos lentos y los movidos rápidos mezclados surge el blanco, gris y negro. De ahí que cdqp no aparecerá rojo a menos que qsrp sea oscuro porque tantos rayos lentos vienen de cdqp y se refractan como si vinieran de eodc; así muchos rayos lentos vienen de cdqp y son refractados como si vinieran de dqpc a menos que qsrp sea más oscuro que dqpc.[36]

Nada en el pasaje sugiere experimentación real; Newton parece intentar simplemente explicar las franjas observadas comúnmente. Si la explicación prueba algo, es que por este rumbo no se llegaría a la simplificación y a la claridad. Evidentemente Newton encontró este camino tan difícil como el lector moderno; no intentó seguir este enfoque otra vez.

En vez de eso Newton fue en una dirección diferente y tomó el segundo gran paso en su trabajo óptico, condensando la confusa complejidad en un solo experimento.

> Tercero. De este experimento aparece que los rayos que hacen el azul son refractados más que los rayos que hacen el rojo. Si una mitad de la franja abc es azul y la otra roja y se pone una sombra o curpo negro detrás de él, entonces al mirar en la franja por un prisma una mitad de la franja aparecerá más alta que la otra y no ambas en una línea directa, por razón de refracciones desiguales en los colores diferentes.[37]

Aparentemente la franja de colores, y no el espectro prismático, fue la primera observación de Newton de refracción diferencial. En efecto era práctica suya citar el experimento de la franja con el espectro para apoyar su teoría. Años después, cuando Anthony Lucas escribió de Liège retando a Newton, citó varios experimentos para apoyar su caso, incluyendo una variante del experimento con la franja. Newton comentó en su respuesta que uno de los experimentos de Lucas, hecho debidamente, era el experimento más notable del que sabía, después del *experimentum crucis*, para demostrar la refracción diferencial de la luz.[38]

Si después cobró importancia en su mente, el experimento no lo hizo de inmediato. Newton había tomado una idea nueva de gran importancia. La había confirmado por un ingenioso experimento. Aparentemente, no se había dado cuenta de su importancia. En su cuaderno, después del experimento hay algunas de las especulaciones citadas antes en que regresó parcialmente a la idea de modificación. Finalmente la discusión llega a una serie de notas sobre el color tomadas de Boyle. Si Newton había descubierto "la más extraña si no es que la más considerable detección que se ha hecho en las operaciones de la naturaleza", él no lo sabía.[39]

Newton mismo nos ha dicho lo que ocasionó una nueva visión sobre el significado del experimento de la franja. Estaba tratando de tallar lentes no esféricas para perfeccionar el telescopio. No es difícil imaginar la escena cuando se dio cuenta por completo. Al ponderar la difícil tarea de generar una superficie no esférica, su mente habría vagado por los problemas de la óptica. De repente la significación del experimento de la franja para el trabajo en que estaba ocupado lo habrá deslumbrado. No hay superficie refractante que pueda enfocar todos los rayos –esto es, no existe

tal superficie si la luz es una mezcla heterogénea de rayos con refrangibilidades diferentes. En este punto Newton habría iniciado una investigación sistemática. Otro cuaderno registra esa investigación.[40] Comienza con algunas observaciones tomadas de Boyle. La hoja de oro, piezas de vidrio colorido, una infusión de *lignum nephriticum*, cada uno aparece de diferentes colores cuando son vistos desde lados opuestos. Newton incluyó las mismas observaciones en el documento que envió a la Sociedad Real en 1672 como ejemplos del proceso de análisis por el que se producen los fenómenos coloridos. En todos ellos, argumentaba Newton, algunos rayos son transmitidos mientras que otros son reflejados, de manera que aparecen colores diferentes en lados opuestos. De las observaciones de Boyle cambió al experimento de la franja. Entonces –su tercer paso significativo– vio la relevancia del espectro prismático para su idea.

Newton difícilmente habría dejado de intentar la proyección. Boyle la había hecho y había llamado al prisma "el instrumento más útil que los hombres han utilizado hasta ahora para la contemplación de los colores..."[41] Descartes y Hooke, entre los que había leído, y Marci y Grimaldi entre los otros, habían usado al espectro prismático como la evidencia central para sus teorías del color. Newton ahora percibía que el mismo experimento debía confirmar o negar su nueva teoría, y si la confirmaba, derrocaría las de sus predecesores. Sin embargo, no el mismo experimento; así como otros habían ajustado el experimento a sus necesidades, igual Newton lo adaptó a las suyas. La primera instancia registrada de su proyección prismática incluía dos modificaciones específicas de experimentos anteriores. Cuando los investigadores anteriores habían observado dispersión, la habían vinculado al diámetro aparente del sol. Cuando Pardies envió sus inteligentes comentarios sobre el documento de Newton a la Sociedad Real en 1672, se aferró al mismo punto. Newton estaba plenamente consciente de esta posible explicación de la dispersión. Calculó que cuando los ángulos de incidencia y refracción de los rayos medios a las dos caras del prisma son

iguales, el efecto del diámetro aparente del sol se neutraliza. Si el prisma se coloca en el ángulo apropiado respecto a los rayos incidentes, la imagen debe ser redonda si todos los rayos tienen la misma refrangibilidad. En la primera instancia registrada del experimento Newton aseveró que el prisma se colocó de manera que los rayos fueran "igualmente refractados" en las dos caras del prisma.[42] También le dejó al espectro espacio suficiente para expandirse, una trayectoria de veintidós pies donde Descartes había permitido unas cuantas pulgadas y Hooke dos pies. En su disertación a la Sociedad Real Newton escribió que "al aplicarme a considerar [los colores del espectro] con más prudencia, quedé sorprendido al verlos en una forma oblonga, la cual, de acuerdo con las leyes recibidas de refracción, esperaba que fuera circular".[43] Las palabras deben tomarse como un recurso retórico que no se debe tomar literalmente. El desarrollo de su argumento en las *Lectiones Opticae* funciona para un efecto idéntico. Primero declaró el concepto de la refracción diferencial como una premisa. Entonces preguntó cuál forma de la imagen debería tener refrangibilidad igual (es decir, "de acuerdo con las leyes recibidas de refracción") y calculó que debía ser redonda. Finalmente presentó el experimento revelando que no es redonda y así sostuvo la premisa afirmada originalmente. Newton no observó un espectro alargado por accidente. Había diseñado con cuidado un experimento, convencido, a la luz de sus primeras observaciones, de que ocurriría tal resultado.

Las investigaciones del color de Newton habían comenzado dentro del marco de las ideas cartesianas, esto es, él también buscaba una explicación mecánica. Sus deliberaciones lo habían llevado al descubrimiento de una nueva propiedad de la luz que estaba inextricablemente entretejida con una reformulación completa de la cuestión del color. Al menos la mitad de su genio yace en su habilidad para reconocer la distinción entre la propiedad y las explicaciones mecánicas. Mientras que Descartes y Hooke habrían arruinado la investigación para imaginar un modelo mecánico, Newton fue capaz de mantener separados los dos procesos y

explorar la propiedad en todo su esplendor. Por supuesto, Newton tenía una explicación desde el principio. Él defendía una teoría corpuscular de la luz, y la vieja tradición de colores fuertes y débiles lo llevó a identificar el azul con partículas pequeñas y el rojo con grandes. En un momento de distracción mientras escribía el documento de 1672 incluyó una referencia sobre la materialidad de la luz, y como resultado se enfrascó en un intercambio con Hooke. Varios pasajes en cartas que siguieron la disertación hacen referencia a su hipótesis corpuscular, y en 1675 presentó una versión de esta a la Sociedad Real. El documento anticipa sus afirmaciones futuras sobre el éter. Newton nunca renunció a la visión cartesiana de una explicación mecánica. Pero pudo ver que la nueva propiedad que él había descubierto era algo completamente distinto. Se rehusó correctamente a mezclar sus demostraciones experimentales de la propiedad con discusiones sobre su origen.

El argumento de Newton en la parte II de las *Lectiones*, y en la versión popularizada que envió a la Sociedad Real, constituye un ataque razonado a la doctrina de modificación. Si el hecho de la refracción diferencial toma una posición líder en el argumento, su función es apoyar conceptos más fundamentales –que la luz blanca (es decir, la luz normal del sol) es una mezcla heterogénea, y que los fenómenos del color son producidos por un proceso de análisis, ya sea por refracción o por reflexión. Así, las observaciones que tomó de Boyle que incluyó en la disertación de 1672 dependen del análisis sin refracción. De forma similar, los ingeniosos experimentos con los colores de las placas delgadas, comenzados en la investigación de su cuaderno, completados en el inédito *Discourse of Observations* (1675), y publicados por último en *Óptica*, tenían la intención de demostrar que el análisis explica los colores de cuerpos tan bien como explica el espectro prismático. La teoría de Newton fue expuesta específicamente para refutar aquellas que le eran más familiares, las teorías de Descartes y de Hooke. Pasajes individuales en las *Lectiones* y en el documento de 1672 revelan que ambos hombres estaban presentes en la mente

de Newton mientras escribía. La discusión del espectro prismático se refiere explícitamente a su insistencia en la necesidad de un medio oscuro que limita el haz de luz, y por supuesto la niega. Newton preguntó si la dispersión puede deberse a un movimiento giratorio adquirido por los corpúsculos en la refracción que causaría que sus trayectorias hicieran curva; la referencia a Descartes es evidente. En un curioso pasaje Newton preguntó si la dispersión podría resultar de "irregularidades contingentes" en el cristal. Medidas obvias de eliminar que esa posibilidad se le ocurriera; podría haber movido el prisma un poco, usado otro ángulo, usado otro prisma. En vez de eso refractó el haz que se dispersaba por un segundo prisma colocado en posición reversa inmediatamente después del primero; de esta manera restauró el rayo blanco redondo y demostró que la dispersión es el producto regular de una causa ordenada y no un fenómeno accidental.[44] El experimento fue importante en la demostración necesaria de que la luz blanca puede recomponerse, pero la discusión es tratada en su totalidad en términos de irregularidades en el cristal. Pasajes de Descartes y de Hooke que explotan una idea similar ayudan a iluminar el procedimiento de Newton. La explicación de Descartes de la cola de un cometa depende de la hipótesis de que la luz reflejada del cometa es dispersada por una superficie en el cielo donde se reúnen corpúsculos de diferentes tamaños.[45] Hooke desarrolló una teoría de lo que llamó la inflexión de la luz al pasar por un medio de densidad variable. Él discutía que las burbujas de aire calentado y rarificado actúan como lentes cóncavos, causando que los rayos diverjan. Esto lo llevó a sugerir que las lentes pueden perfeccionarse para conseguir un foco verdadero al variar la densidad del cristal en vez de su figura.[46] Sin duda sus aseveraciones inmoderadas, frente al telescopio de reflexión de Newton, de lo que podría conseguir por refracción, se basaban en esta idea. A la luz de estos pasajes la discusión de Newton de "irregularidades contingentes" en el prisma empieza a cobrar sentido. Además la famosa frase, *experimentum crucis*, que se convirtió casi en sinónimo de la teoría newtoniana, fue

acuñada por Hooke en sus escritos sobre óptica. Francis Bacon se había referido a una *instantia crucis*; Hooke empleó la frase en su *Micrographia* y extendió la noción con la frase *experimentum crucis*.[47] Newton la tomó prestada y la aplicó al experimento climático en el documento de 1672. Así, muchos pasajes indican que Newton escribió teniendo en mente a Descartes y a Hooke. La referencia más importante a ellos, sin embargo, no es un pasaje aislado. Es la totalidad del argumento de Newton, su refutación razonada del concepto de modificación.

En la parte II de las *Lectiones Opticae* Newton describió una teoría completa sobre los colores. Quizá las dimensiones completas de su genio son tan visibles en este como en cualquier otro de sus trabajos. Antes de que cualquier crítico cuestionara sus conclusiones, él había previsto las objeciones que surgirían y les proporcionó respuestas. En los intercambios que siguieron a la publicación Newton obtuvo un grado más alto de claridad y concisión al describir lo esencial de su teoría, con un costo de considerable desgaste psíquico. Pero casi todo el material que ahora producía para apoyar su posición había ya sido afirmado en las lecciones. En muchas maneras el documento de junio de 1672, enviado en respuesta a Hooke, muestra el poder experimental de Newton en mayor grado que en el documento original enviado en febrero. Con una certeza perfecta tomó los problemas centrales que Hooke había señalado y desarrolló experimentos brillantes para resolverlos. O más bien parecía que desarrollaba experimentos, porque todos estos ya habían sido expuestos en las *Lectiones*. Al haber pensado el problema completamente, Newton había sido capaz de presentar una teoría del color completamente elaborada.

Mientras que la teoría de la modificación sostenía que la luz ordinaria del sol es simple y homogénea, Newton demostró que es una mezcla heterogénea de lo que él llamó rayos diformes, rayos que diferían en refrangibilidad, en reflexibilidad y en el color que exhiben. Una de sus afirmaciones más claras sobre el punto aparece en una respuesta a Huygens en 1673.

1. La luz del sol consiste en rayos que difieren por grados indefinidos de refrangibilidad.
2. Los rayos que difieren en refrangibilidad cuando son separados difieren proporcionalmente en los colores que exhiben. Estas dos proposiciones son fácticas.
3. Existen tantos colores simples u homogéneos como hay grados de refrangibilidad. A cada grado de refrangibilidad le corresponde un color diferente por la proposición 2. Y ese color es simple...
4. La blancura en todos los respectos como la luz inmediata del sol y la de todos los objetos usuales de nuestros sentidos no se puede componer de solo dos colores simples...
5. La blancura en todos sus respectos como la de la luz inmediata del sol no se puede componer de colores simples, sin una variedad indefinida de ellos.[48]

Los hombres del siglo XVII no encontraron esto como algo fácil de entender. En 1676, por ejemplo, después de que el problema había sido discutido ante ellos por más de cuatro años, miembros de la Sociedad Real aun preguntaban si los rayos de luz no deben su exhibición de colores diferentes a sus diversos grados de velocidad "¿en vez de, como pensó el señor Newton, a los varios grados inherentes de refrangibilidad de los rayos mismos?"[49] Al responder a la pregunta Newton intentó asentar el asunto de una vez por todas.

> *Que en cualquier hipótesis de donde se puede suponer que los rayos tengan diversidades originales, ya sea en tamaño o forma o movimiento o fuerza o calidad o cualquier otra cosa imaginable que pueda ser suficiente para diferenciar esos rayos en color y refrangibilidad, no hay necesidad de buscar otras causas de estos efectos que las mismas diversidades originales.* Estableciendo esta regla, mi argumento es así. En cualquier hipótesis, la luz al venir del sol se debe suponer ya sea homogénea o heterogénea. Si es esta última, entonces esa hipótesis comprendida en esta regla general y entonces no puede estar en mi contra: si es la primera entonces las refracciones deben tener el poder de modificar la luz de manera que se cambie su calificación colorífica y refrangibilidad, lo que va en contra de la experiencia.[50]

Todos los fenómenos de los colores son producidos no por la modificación de la luz simple ni por la mezcla de luz con otra cosa, sino por análisis, por cualquier modo, de la mezcla hetero-

génea en sus componentes. Newton sostenía que la propagación rectilínea de la luz se puede desviar por dos medios generales, refracción y reflexión. Cuando Hooke atrajo la atención de la difracción, Newton declaró que era meramente un caso especial de refracción. Porque los rayos difieren en sus grados inherentes de refrangibilidad, son separados por la refracción. El experimento con el espectro prismático fue la demostración principal de este hecho. "Y lo que se dice de su refrangibilidad", agregó al final de su *Discourse of Observations* en que investigó los colores en placas delgadas, "se puede entender de su reflexibilidad: esto es, de sus disposiciones a ser reflejados, en algunos más grande y en otros a menor grosor de las placas delgadas o burbujas, a saber, que esas disposiciones son también inherentes a los rayos, e inmutables..."[51]

> Porque yo sostengo [afirmó en una carta] que todos los fenómenos de los colores en el mundo resultan de nada más que de las separaciones o mezclas de rayos disformes y que las diferentes refrangibilidad y reflexibilidad son los únicos medios por los que esas separaciones o mezclas se hacen.[52]

En la hipótesis de la luz Newton redujo la reflexión y la refracción a un solo proceso, la flexión de un rayo rectilíneo que pasa por un medio (éter) de densidad variante. Todos los fenómenos de los colores, entonces, pueden rastrearse al tamaño de los corpúsculos que constituyen los varios rayos.

> Supongo yo que así como los cuerpos de diferentes tamaños, densidades o tensiones excitan sonidos de varios tonos por percusión u otra acción y en consecuencia vibraciones en el aire de varios tamaños, así los rayos de luz, al chocar en las superficies rígidas refractantes excitan vibraciones en el éter, aquellos rayos, como quiera que sean, al diferir en magnitud, fuerza o vigor, excitan vibraciones de varios tamaños; los rayos más grandes, más fuertes o más potentes las vibraciones más grandes y otros más cortas de acuerdo con su tamaño, fuerza o poder. Y por tanto las puntas de los filamentos del nervio óptico, que cubren o están frente a la retina, siendo tales superficies refractantes, cuando los rayos chocan en ellos deben excitar estas vibraciones, que (así como las del sonido en un tronco o trompeta) correrán a lo largo de los poros acuosos o tejido cristalino de los filamentos a través de los nervios ópticos hacia el sensorio (lo que la luz por sí sola no puede hacer,) y ahí supongo afectan el sentido con varios colores de

> acuerdo con su tamaño y mezcla; las más grandes con los colores más fuertes, rojos y amarillos; las más pequeñas con los más débiles, azules y violetas; las medias con verde, y una confusión de todas con blanco, de manera parecida a la que en el sentido del oído la naturaleza hace uso de vibraciones aéreas de diversos tamaños para generar sonidos de diversos tonos, como se ha de observar en la analogía de la naturaleza.[53]

Ya que acordó que todos los rayos de luz tienen una velocidad común, las diferencias en "magnitud, fuerza o vigor" solo pueden significar diferencias en la primera de estas.

Una faceta de esta teoría en que Newton insistió es su relación con la ley de los senos. Una vez que se fue establecida la dispersión de la luz en la refracción, el procedimiento ordenado de la naturaleza llegó a cuestionarse a menos que la naturaleza diforme de la luz fuera admitida. Si la contención aseverada por Hooke después del documento de 1672 fuera cierta, que la dispersión es generada en la refracción, entonces la refracción es un proceso fortuito no gobernado por leyes. Al aplicar la ley de los senos a cada especie de rayo, Newton la reafirmó.

Una consecuencia necesaria de la nueva teoría del color es la inmutabilidad de los rayos. Por refracción y reflexión pueden ser mezclados y separados, pero en sus propiedades inherentes de refrangibilidad, reflexibilidad y propensión a exhibir cierto color permanecen sin cambio. Darse cuenta por completo de esta consecuencia, como revela el argumento en la parte II de las *Lectiones*, llevó a la concepción del *experimentum crucis*. El *experimentum crucis* en cambio se convirtió en el ancla de la posición newtoniana, cuyos críticos no podían ni cuestionar ni ignorar.

> Y por tanto [concluyó él], si por refracción o cualquier otra de las causas mencionadas los rayos diformes latentes en tal mezcla son separados, emergerán colores diferentes al color de la composición. Esos colores no son generados nuevos, solo se hacen aparentes al ser separados.[54]

Dicha de esta manera, la teoría de Newton aparece como la aplicación del principio de inercia a la teoría del color, en especial cuando se lee en conjunto con la hipótesis de la luz. El cambio es meramente un cambio de velocidad de acuerdo con

la regla estricta de que *F* es igual a *ma*. Las propiedades de una partícula son indiferentes a su estado de movimiento, y no sufren cambio alguno con él.

El argumento de dos milenios sobre el número de colores primarios fue terminado con la inesperada respuesta de infinidad. A tantos grados de refrangibilidad como hay entre los casos extremos, tantos colores hay. Y el ángulo de dispersión es infinitamente divisible. Newton designó las especies individuales de rayos, y los colores simples que exhiben, con una variedad de adjetivos– primarios, primitivos, descompuestos, simples, originales, homogéneos.[55] Infinitos en número, caben entre los extremos del púrpura y el rojo en una escala ordenada –una escala discontinua en que cada color es una entidad sencilla discreta e inmutable, una escala continua en la que los pasos entre ella son indefinidamente pequeños.

Aun más sorpresivo fue el tratamiento del blanco y el negro. Los que antes eran los dos extremos de la escala de color, fueron eliminados de la escala por completo –e identificados. Mientras que el blanco se había asociado con la luz pura y los colores con mezclas, Newton revirtió las posiciones. El blanco (es decir, el blanco puro) se puede producir solo por una mezcla heterogénea de todos los rayos. "Esta creo yo ha parecido la más paradójica de todas mis aseveraciones", comentó, "y se ha encontrado con el prejuicio más universal y obstinado".[56] Las *Lectiones* indican que quizá a Newton mismo le había parecido esta una conclusión difícil de aceptar; la sección más larga, más completa y más brillante de la parte II está dedicada a ella, como si Newton se sintiera obligado a convencerse a sí mismo más allá de cualquier duda posible. Por varios métodos ingeniosos analizó la luz del sol en sus componentes; por medios igualmente ingeniosos reconstituyó la composición original. El último paso era obligatorio, Newton tenía que demostrar que una mezcla de los rayos separados aparece blanca si fuera a establecer su posición. En el documento de 1672 incluyó uno de estos experimentos. Interceptó los rayos divergiendo de un prisma con una lente y los llevó a un

foco. Una pantalla entre la lente y el foco proyectaba el espectro en forma reducida, más allá del foco mostraba el espectro con el orden de los colores invertido, en el foco mostraba el blanco. Cuando Hooke desafió esta posición, Newton agregó varias modificaciones al experimento. Si observaba el foco blanco a través de un prisma, veía de nuevo los colores del espectro. Cuando interceptó un color en la lente, el mismo color desaparecía de la imagen vista a través del prisma. En uno de sus experimentos más hermosos acomodó una rueda dentada entre la lente y el foco de manera que al girar los dientes interceptaban algunos de los rayos convergentes. Al girar lentamente la rueda, una sucesión de colores parpadeaba en la pantalla. Cuando la velocidad de la rotación aumentó hasta que la sucesión ya no podía distinguirse, el foco de nuevo apareció blanco. El blanco, es decir, no se ha de identificar con una sola entidad física; es la sensación producida por una mezcla heterogénea de todos los rayos. El gris y el negro difieren de él solo en intensidad; considerados como colores son idénticos al blanco. Para demostrar este punto Newton reflejó rayos de la luz del sol de superficies coloridas sobre un papel blanco. En cada caso el papel proyectaba el color de la superficie, es decir, el color exhibido por los rayos que esa superficie reflejaba más copiosamente. Cuando se usaba una superficie negra, suponiendo por supuesto que reflejaba muy poca luz, el papel proyectaba blanco.

Al destruir la concepción del color como una escala de gradación entre cualidades opuestas, Newton hizo posible su tratamiento matemático. De nuevo la afinidad de su teoría con la nueva filosofía de la naturaleza es evidente. Ligero y pesado ya no serían considerados opuestos, sino grados de la misma cualidad; lo mismo aplicaba para caliente y frío. Newton ahora identificaba colores con rayos dados que poseían otras cualidades objetivas y ponderables. Los grados de refrangibilidad podían arreglarse en una sola escala absoluta, mientras que una escala que se extendiera de blanco a negro necesariamente adolecía de una referencia absoluta. La sensación subjetiva del color se

convirtió en poco más que un símbolo conveniente para significar la entidad ponderable.

Tanto en mecánica como en matemáticas el logro de Newton representa la culminación de trabajo anterior. Ninguno de sus predecesores, sin embargo, hizo recto el camino hacia una nueva teoría del color. Frente a una larga tradición santificada por su aparente encarnación del sentido común, fue capaz de reconocer sus asunciones, concebir otras, y al final mantenerlas victoriosamente. Darse cuenta de que los objetos familiares pueden ser concebidos en términos completamente desconocidos no es un asunto fácil. Cuán difícil era esa labor intelectual es revelado por el caso de Descartes, quien conscientemente rechazó la tradición pero fue incapaz de reconocer que los dictados del sentido común concernientes al color pertenecían también a la tradición. También es revelado por la reacción a la teoría de Newton, en especial por parte de hombres como Hooke y Huygens. Incluso con la teoría presentada ante ellos apoyada por pruebas experimentales, fueron incapaces de deshacerse de los objetos familiares del mobiliario intelectual. Huygens nunca aceptó la nueva teoría. Quizá era necesario que Newton tomara el paso inicial, el paso más difícil, al inicio mismo de su carrera científica, antes que la tradición se hubiera convertido en una parte de su naturaleza demasiado íntima para ser reconocida y considerada objetivamente. Como quiera que sea, él dio el paso, y puso la teoría de los colores de cabeza al emplear una idea totalmente nueva. De forma más clara que cualquier otra cosa en su carrera, el trabajo de Newton en óptica revela su poder de pensamiento original.

NOTAS

[1] Grinnell College.

[2] Newton a Oldenburg, 6 de febrero de 1671/2; *Isaac Newton's Papers & Letters on Natural Philosophy*, ed. I. Bernard Cohen (Cambridge, Mass., 1958), p 47.

[3] *Principles of Philosophy*, parte III, 53.

[4] Ibíd., parte I, 68-70.

[5] *Dioptrique*, Discours 1; *Oeuvres de Descartes*, ed. Charles Adam and Paul Tannery, 12 vols. (París, 1897-1920), *6*, 83-93.

[6] *Les meteoros*, Discours 8; Ibíd., *6*, 331-4.

[7] Ibíd., *6*, 335.

[8] Seguramente la insistencia de Descartes en una refracción sencilla que no se destruye por una contraria determinó un aspecto del *experimentum crucis* de Newton; Newton invariablemente colocó el segundo prisma en una posición opuesta a la primera.

[9] Ibíd., *6*, 329-30. Descartes no dice explícitamente que usó tableros, solo son baldosas opacas que yo supongo eran tableros.

[10] *De anima*, libro II, 7; *Meteorologica*, libro III, 4.

[11] Cf. *De sensu*, cap. III.

[12] Ibíd., cap. VI.

[13] *De iride seu de iride et speculo; Die Philosophischen Werke*, ed Ludwig Baur (*Beisträge zur Geschichte der Philosophie des Mittelalters*, 9, Münster i. W., 1912), p. 77.

[14] A. C. Crombie, *Robert Grosseteste and the Origins of Experimental Science, 1100-1700* (Oxford, 1953), p 199.

[15] Ibíd., pp. 229-31.

[16] Ibíd., p. 246; cf. Carl B Boyer, *The Rainbow: from Myth to Mathematics* (Nueva York y Londres, 1959), p. 113.

[17] *Lectiones Opticae; Mathematical Works*, ed. W. Whewell (Cambridge, 1860), pp. 107-8.

[18] *Les meteores*, Discours 8; *Oeuvres*, *6*, 334.

[19] Citado en L. Rosenfeld, "Marcus Marcis Untersuchungen über das Prisma und ihr Verhältnis zu Newtons Farbentheorie", *Isis*, 17 (1932), 327. No he podido ver una copia del raro *Thaumantias*, *Liber de Arcu Coelesti* (Praga, 1648) de Marci. Inevitablemente las consideraciones de su trabajo son guiadas, al menos a un punto considerable, por cuestiones diferentes a la mía. No he podido encontrar una explicación detallada de su proyección prismática. Al parecer, como indica la frase citada, él igualó la producción de cada color con un ángulo de refracción definido en que la luz es "condensada" a cierto grado. El ángulo de incidencia es el factor determinante

en esta teoría, y el espectro es posible por la inclinación de los rayos en un lápiz de luz incidente. La luz "condensada" es aparentemente distinta de la luz intensa. De hecho condensación parece significar rarefacción, y su concepto parece repetir la idea de Witelo del debilitamiento de la luz por medio de la refracción. La mejor discusión de la teoría de los colores de Marci que yo he visto se encuentra en Boyer, *Rainbow*, pp. 220-1. Cf. el artículo de Rosenfeld citado antes y Edmund Hoppe, "Marcus Marci de Kronland", *Archiv für Geschichte der Mathematik*, *10*, (1927), 282-90.

[20] Francisco Maria Grimaldi, *Physicomathesis de lumine, coloribus, et iride* (Bononiae, 1665), pp. 254-62.

[21] Su título completo es *Experiments and Considerations Touching Colours; The Works of the Honourable Robert Boyle*, ed. Thomas Birch, nueva ed. 6 vols. (Londres, 1772), *I*, 662-788.

[22] Ibíd., *I*, 689.

[23] Ibíd., *I*, 696, 746.

[24] Ibíd., *I*, 695-6.

[25] Ibíd., *I*, 670.

[26] Ibíd., *I*, 726-7.

[27] *Micrographia: or Some Physiological Descriptions of Minute Bodies Made by Magnifying Glasses. With Observations and Inquiries Thereupon* (Londres, 1665), pp. 60-1.

[28] Ibíd., "Prefacio".

[29] Ibíd., p. 61.

[30] Ibíd., p. 58.

[31] Ibíd., p. 64.

[32] *Add. 3996*, Univ. Lib., Cambridge; se citan pasajes extensos del cuaderno en A. R. Hall, "Sir Isaac Newton's Note-book, 1661-65", *Cambridge Historical Journal*, *9* (1948), 239-50.

[33] *Add. 3996*, folio 105v.

[34] Ibíd., folio 122v.

[35] Ibíd., folio 123v.

[36] Ibíd., folio 122v.

[37] Ibíd., folio 122v.

[38] Newton a Oldenburg, 18 de agosto de 1676; *The Correspondence of Isaac Newton*, ed. H. W. Turnbull, 6 vols. proyectados [projected] (Cambridge, 1959), *2*, 80.

[39] Newton a Oldenburg, 18 de enero de 1671/2; *Correspondence*, *1*, 82-3.

[40] *Add. 3975*, pp. 1-20, Univ. Lib., Cambridge; se citan pasajes extensos en A. R. Hall; "Further Optical Experiments of Isaac Newton", *Annals of Science*, *11* (1955), 27-43.

[41] *Works*, *I*, 738.

[42] *Add. 3975*, p. 2. Newton realizó experimentos ulteriores en los que estrechó el lápiz incidente a 7' con el fin de demostrar la refracción diferencial. En una ocasión realizó el experimento con el haz de Venus.

[43] Cohen, ed., *Newton's Papers*, p. 48.

[44] Ibídem.

[45] *Le monde*, Cap. xv; *Principles of Philosophy*, parte iii. En su cuaderno inicial Newton anotó un párrafo titulado "Of y^e^ Sunn Starrs & Planets & Comets" ("Sobre el sol, estrellas y planetas y cometas") que contenía una cantidad de preguntas sobre vórtices incluyendo la siguiente: "Whither Cartes his relflexion will unriddle y^e^ mistery of a Comets bird [beard]" ("Si la reflexión de Cartes desentrañará el misterio de la barba de un cometa") (*Add. 3996*, folio 93v.). La respuesta de Newton a la crítica de Hooke de su disertación se refería explícitamente a este punto. "Entre otras irregularidades no sé qué es más obvio de sospechar que una dilatación y esparcimiento fortuito de la luz de la manera que Descartes ha descrito en sus refracciones etéreas para explicar la cola de un Cometa..." (Newton a Oldenburg, 11 de junio de 1672; *Correspondence*, *I*, 178).

[46] *Micrographia*, pp. 220-1, 232-3. Las notas de Newton sobre la *Micrographia* contienen este punto (*Add. 3958.1*, folio 4).

[47] *Novum Organum*, Lib. ii, Aph. xxxvi; *The Works of Francis Bacon*, eds. James Spedding, Robert Leslie Ellis y Doublas Denon Heath, 14 vols. (Londres, 1858-62), *1*, pp. 294 y ss. Hooke, *Micrographia*, pp. 54, 59. Quizá algo del resentimiento de Hooke surgió al darse cuenta de que su propia frase se había adaptado a una demostración que lo refutaba.

[48] Newton a Oldenburg, 23 de junio de 1673; *Correspondence*, *1*, 293.

[49] Thomas Birch, *History of the Royal Society*, *3*, 295; citado en Cohen, ed., *Newton's Papers*, p. 225.

[50] Newton a Oldenburg, 15 de febrero de 1675/6; *Correspondence*, *I*, 419-20.

[51] Cohen, ed., *Newton's Papers*, p. 224.

[52] Newton a Oldenburg, 15 de febrero de 1675/6; *Correspondence*, *I*, 418.

[53] Newton a Oldenburg, 7 de diciembre de 1675; *Correspondence*, *1*, 376.

[54] Cohen, ed., *Newton's Papers*, p. 54.

[55] *Correspondence*, *1*, 180, 287, 291, 293.

[56] Newton a Oldenburg, 7 de diciembre de 1675 (*Discourse of Observations)*; *Correspondence*, *1*, 385. Newton borró este enunciado de la versión final del *Discourse*.

Definición de Newton de un rayo de luz y las teorías de difusión de la dispersión cromática

Alan E. Shapiro[1]

Shapiro, ISIS, "Newton's Definition of a Light Ray and the Diffusion Theories of Chromatic Dispersion" 66: 2 (1975) pp. 194 to 210. © **University of Chicago Press**.

Ignace Gaston Pardies y Robert Hooke, dos de los autores líderes de una teoría sobre la onda de la luz en el siglo XVII, fueron también dos de los más destacados oponentes de la teoría del color de Newton en 1672. Pardies y Hooke percibieron correctamente que Newton apoyaba una teoría de emisión de la luz, y atendieron a reinterpretar sus conclusiones en términos de una teoría de onda de la luz. Como una alternativa ante el concepto de Newton de refrangibilidad desigual (dispersión cromática), propusieron que una difusión o expansión ocurre en los bordes de un haz de luz refractado. Sus teorías, a las que yo llamo teorías de difusión de la dispersión cromática, eran una alternativa burda e inadecuada, pues no pudieron aportar nada a las más fundamentales observaciones de Newton. Por parte de Newton, ya había formulado la posición sobre la teoría de onda de la luz que habría de sostener por el resto de su vida: "a mí la suposición fundamental misma me parece imposible."[1] Él había probado a su propia satisfacción que una teoría de onda de la luz violaría el principio de propagación rectilínea, dado que una onda se esparce en todas las direcciones y se propaga en la sombra geométrica de un objeto situado en su camino.

En parte, entonces, Hooke y Pardies por un lado y Newton por el otro vieron la disputa sobre la naturaleza de los colores como la de una teoría de la luz de onda contra la de emisión. No obstante, Newton, pasó por alto este asunto y argumentó correctamente que su teoría de los colores era independiente de todas las hipótesis sobre la naturaleza de la luz; por tanto, era compatible con todas ellas y en particular con una teoría de onda, aunque no con la de ellos. Su doctrina de refrangibilidad desigual fue establecida por demostración experimental, y en vista de que sus teorías de difusión (de Hooke y Pardies) no aportaban nada al fenómeno observado, su preocupación por las teorías de onda no venía al caso. Newton pasó entonces a demostrar cómo sus

teorías podían hacerse compatibles de hecho con su teoría: todo lo que necesitaban hacer era abandonar su punto de vista de que la luz blanca consiste en luz de una sola onda y considerar que consiste en muchas ondas diferentes, cada una de las cuales ha sufrido un distinto grado de refracción.[2]

Poco después de que este documento fue presentado a la Royal Society, Newton intercambió una serie de cartas con Hooke y Pardies, en las cuales defendía su teoría del color.[3] Uno de los más curiosos rasgos de esta correspondencia es la definición de los rayos de luz que Newton propuso en su segunda carta a Pardies:

> Y por *rayos* de luz entiendo sus partes menores o indefinidamente pequeñas, las cuales son independientes una de otra; tal como lo son todos aquellos rayos que emiten los cuerpos luminosos ya sea simultánea o sucesivamente a lo largo de líneas rectas.[4]

A primera vista esta definición de un rayo de luz parece ser la de un corpúsculo de luz o átomo. Podría parecer, como ha argumentado A.I. Sabra, que Newton no quería permitir que una teoría de onda de la luz fuera compatible con su teoría de los colores, como repetidamente lo había afirmado.[5] Incluso, para Sabra, la definición de Newton de un rayo de luz es un aspecto del "dogmatismo newtoniano."[6] La interpretación de Sabra sobre la definición de Newton es sorprendente, dado que esta definición es precedida inmediatamente por una de sus muchas críticas contra las hipótesis, y por tanto implicaría a Newton en una evidente inconsistencia.[7]

Intento demostrar, sin embargo, que, al ser considerada en su contexto propio como una refutación de las teorías de difusión de la dispersión cromática, la definición de Newton de un rayo de luz no es una definición de un corpúsculo de luz, sino simplemente un estatuto fenomenológico que cada parte de un haz de luz es refractado y reflejado de acuerdo con una ley regular independientemente de cualquier otra parte del haz de luz. La definición de Newton sería por lo tanto incompatible sólo con las teorías de difusión de Hooke y Pardies, no con sus teorías de onda, de las cuales esta derivó.

Mi meta no es simplemente la de analizar la definición de Newton de un rayo de luz, ni la de entrar en disputa con Sabra y otros[8] sobre su significado, dado que particularmente ha sostenido una interpretación similar durante algunos años. En vez de eso, espero iluminar un aspecto de las investigaciones de Newton sobre el color que han sido largamente ignoradas –su negación de las teorías de difusión de la dispersión cromática. Esto también debería proporcionar una perspicacia más profunda en torno a la disputa de Newton con Hooke y Pardies sobre la naturaleza de la luz blanca y los colores, dado que el descubrimiento de Newton de la dispersión cromática fue el cimiento mismo de su teoría de los colores. Aunque aquí no estaré dirigiendo al asunto de la naturaleza de la luz blanca y los colores, por fuerza habré de tocarlo, pues, por su misma naturaleza, la dispersión cromática involucra a los colores.

La versión más elaborada de una teoría de difusión de la dispersión cromática con que Newton estaba familiarizado fue la presentada por Hooke en su *Micrographia*. En consecuencia, consideraré la teoría de Hooke con algún detalle, aunque la negación de Newton de las teorías de difusión es presentada más claramente y con más generalidad en su intercambio con Pardies que en el que hizo con Hooke. Pardies, a diferencia de Hooke, no propuso una teoría alternativa detallada como sustituto para la teoría de Newton de la refrangibilidad desigual. Newton estaba, por lo tanto, en capacidad de rechazar la alternativa de Pardies en el nivel más fundamental sin empantanarse rechazando una teoría de difusión específica, como la del pulso "partido o rarificado" de Hooke. Es claro, sin embargo, que Newton pretendía que su segunda carta a Pardies –su negación general de las teorías de difusión– fuera considerada junto con su respuesta a Hooke, pues las dos cartas fueron escritas al mismo tiempo y enviadas juntas a Henry Oldenburg, el secretario de la Real Sociedad.[9] Además, hay referencias a Hooke en la segunda carta de Newton a Pardies.

Pardies y Newton intercambiaron cartas en dos ocasiones. En su primera carta, Pardies no planteó directamente ninguna

cuestión fundamental acerca de la naturaleza de la luz y los colores. Simplemente intentó reinterpretar las observaciones de Newton sobre la elongación del espectro y el *experimentum crucis* "de acuerdo al común y a las leyes de la dióptrica recibidas."[10] Las primeras objeciones de Pardies estaban basadas en ciertos malentendidos sobre el arreglo experimental, los cuales Newton inmediatamente le aclaró. Pardies aceptó de buena gana su malinterpretación.

Así falló la primera línea de ataque de Pardies. En su segunda carta tomó un rumbo completamente distinto. Argumentó que la dispersión cromática que Newton atribuía a la refrangibilidad desigual de los rayos diferentes podía ser explicada igualmente por una difusión a los lados del haz:

> Pues de acuerdo a esa hipótesis, la cual es explicada a detalle por nuestro Grimaldi y en la cual se supone que la luz es una cierta sustancia movida muy rápidamente, puede tomar lugar alguna difusión [*diffusio*] de la luz después de su paso a través del orificio y el cruce de sus rayos. También en esa otra hipótesis en la que se hace que la luz proceda por ciertas ondulaciones de una materia sutil, como explica el muy sabio Hooke, los colores pueden ser explicados por una cierta difusión y expansión de las ondulaciones, hechas a los lados de los rayos detrás del hoyo por la influencia y continuación de una materia sutil. Incluso admito que tal hipótesis... supongo que aquellos colores aparentes surgen tan sólo de esa comunicación de moción que es difusa lateralmente por las ondulaciones directas. Así que si los rayos que penetran por el hoyo *a* [ver fig. 1] procedieran directamente sobre *b*, las ondulaciones tienen también que terminar directamente (respetando su moción directa y natural) en la línea recta *ab*; aún sin embargo, a causa de la continuidad de la materia hay comunicación de la moción sobre los lados *cc*, donde excita ciertos estremecimientos y ondas sucesivas. Y si se supone que los colores consisten en las ondulaciones laterales, todo su fenómeno puede ser explicado de esta manera... por lo cual además aparecerá la razón por la que la extensión de los colores puede ser expandida más allá de la divergencia de los rayos mismos.[11]

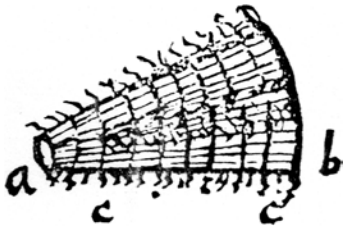


Figura 1. Teoría de difusión de la dispersión cromática de Pardies, tomada de *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 15 de julio de 1672 (n. 85):5012.

Desde la simple teoría de difusión de Pardies ya podemos ver la característica fundamental de todas las teorías de difusión: que los rayos de luz individuales no son físicamente independientes. Los colores son producidos por la refracción de una colección de rayos –un haz– en vez de por la refracción de un solo rayo independiente. Los rayos al borde del haz llevan una refracción distinta a la de los rayos en el centro del haz, dependiendo del estado de la materia sutil envolvente, esto es, sea iluminada o no iluminada.

Antes de considerar la respuesta de Newton a Pardies, debo considerar brevemente la teoría del color de Hooke a la que Pardies apoyó. En su *Micrographia*, Hooke propuso una teoría de onda de la luz en la que los rayos son normales al frente de la onda solo en el caso de una onda esférica propagada en un medio isotrópico. Tras una refracción (fig. 2), el frente de la onda o pulso *AH*, *AH* se vuelve oblicuo a los rayos matemáticos *BO*, *AN*; es esta oblicuidad del frente del pulso lo que produce los colores.[12] Es evidente en la figura que los rayos *BO*, *AN* aún son paralelos después de la refracción y por lo tanto esa teoría de Hooke en este estado no puede aportar nada a la dispersión cromática. Hooke explicó la dispersión cromática por una difusión en los lados del rayo físico *ANOB*:

...si consideramos la manera del progreso del pulso, parecerá racional concluir que la parte o final del pulso que precede al otro debe necesariamente ser algo más *obtunded* o impedida por la resistencia del *medio* transparente que la otra parte o final de este que es subsecuente, cuyo camino es, como era, preparado por el otro; especialmente si el *medio* adyacente no está de la misma manera iluminado o agitado... De lo cual habrá un tipo de deadness (inercia-amortiguamiento) sobreinducida al lado HHH, el cual se incrementará continuamente desde B y pegará más y más profundamente dentro del rayo por la línea BR... Enseguida en el otro lado del rayo AAN, el final A del pulso AH será promovido o reforzado, teniendo su paso ya preparado como lo fue por las otras partes precedentes, y así su impresión será más fuerte; y a causa de su oblicuidad con el rayo, habrá propagada una especie de moción borrosa en QQ, el *medio* adyacente oscuro o quieto, al cual la moción borrosa esparcirá más y más hacia QQ, tal como el rayo es propagado más y más desde A, es decir, tanto como la línea MA, de lo cual todo el triángulo MAN será teñido con un *rojo*...[13]

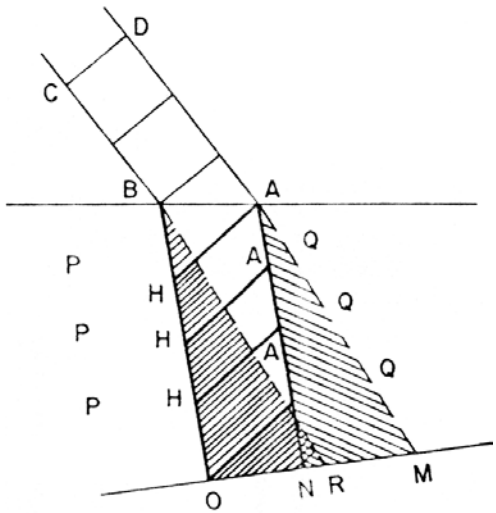


Figura 2. Teoría de difusión de la dispersión cromática de Hooke.

Mientras Hooke dio cuenta cuantitativa de los colores producidos por frente oblicuo del pulso, su explicación de la dispersión cromática fue puramente cualitativa. No dio indicación de la

magnitud de la difusión lateral, ni dio una explicación de por qué la difusión es abruptamente terminada por las líneas *BR* y *MA*.[14] Hooke había obviamente observado la dispersión cromática, pero no la había medido con éxito. Su explicación de la dispersión era claramente un ajuste ad hoc que no jugó un rol posterior en su teoría del color tal como está desarrollada en su *Micrographia*. De hecho, su explicación del color depende solamente de la oblicuidad del frente del pulso. Fue solo hasta la aportación de la dispersión cromática de Newton que Hooke enfatizó la difusión; en su crítica de la teoría de Newton, Hooke se refiere a esta difusión como un rayo "partido o rarificado."[15] La teoría de los colores de Hooke es una teoría de-dos-colores (ver fig. 2): el lado *BO* del rayo físico con que el frente hace un ángulo agudo que es azul, y el lado *AN* con el ángulo obtuso rojo. La fuerza de cada color varía desde el borde hacia adentro, esto es, desde un azul profundo a un azul claro en el lado en el triángulo *RBO* y desde un rojo profundo sombreando a un amarillo en el otro lado en el triángulo *MAN*. El verde surge de una mezcla de amarillo y azul claro en la región donde *AN* y *BR* se cruzan, y por lo tanto no es un color puro como el rojo y el azul.[16]

Hasta aquí Hooke ha descrito cómo se producen los colores en solo un rayo físico *ANOB* que llega desde una fuente de punto, o desde un punto de una fuente luminosa como puede ser el sol. Para explicar cómo se produce el espectro por la refractación de todos los rayos desde una fuente finita, Hooke invocó una interacción física entre ellos. En la siguiente figura (fig. 3), el rayo físico *AKSB* proviene del punto más bajo de una fuente como el sol y el rayo físico *ANOB* desde el punto más alto:

> En este caso el rayo AKSB tendrá su triángulo *rojo* completo como yacente próximo al *medio* oscuro o quieto, pero el otro lado de este, BS, no tendrá *azul*, porque el *medio adyacente* a él, SBO, está movido o iluminado, y consecuentemente esa luz destruye el color. Así que del mismo modo el rayo ANOB perderá su *rojo* porque el *medio adyacente* está movido o iluminado, pero el otro lado del rayo que es *adyacente* al oscuro, es decir, AHO, conservará su *azul* completo...[17]

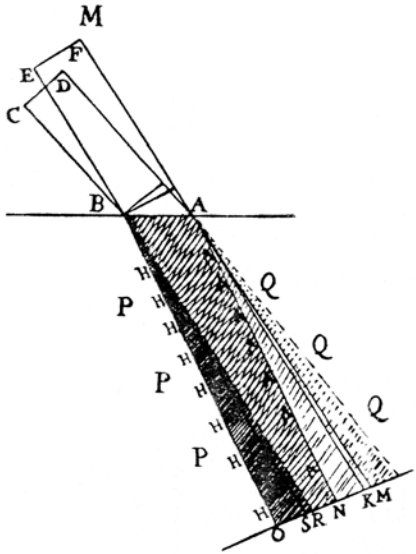


Figura 3. Explicación de Hooke del espectro del sol, tomada de *Micrographia*, esquema VI.

Para Hooke, cada rayo no es físicamente independiente de los otros, puesto que el resultado de la refracción para un rayo dado es muy diferente dependiendo de si tiene un no un rayo vecino.

Ahora que hemos considerado las teorías de difusión de Pardies y de Hooke con cierto detalle, estamos en posición de apreciar enteramente el argumento de Newton contra ellos en su segunda carta a Pardies. En su carta a Newton, Pardies quedó directamente en manos de Newton al rechazar la refrangibilidad desigual en favor de una difusión en el borde. Newton había anticipado en parte tal interpretación de su teoría y ya había realizado todos los experimentos que presentaría a Pardies y a Hooke aún antes de que apareciera su primer documento.[18] Estaba preparado para rechazar todas las teorías de difusión de la dispersión cromática, no sólo la de Pardies.

Newton abrió su réplica a Pardies notando que, en adición a los intentos de Pardies, Hooke y Grimaldi por explicar el

estiramiento del espectro por una difusión, "puede sumarse la hipótesis de Descartes, en la que una difusión similar de *conato* o presión de los glóbulos puede ser concebida, como se supone en aportaciones a las colas de los cometas. Y la misma difusión [*diffusio*] o expansión puede trazarse de acuerdo con cualquier otra hipótesis en que la luz se supone un poder, acción, cualidad o cierta sustancia emitida en toda dirección desde cuerpos luminosos."[19] Esto motivó una de las críticas de Newton en contra de las hipótesis: "hay que observar que la doctrina que he explicado con respecto a la refracción y los colores consiste solo en las propiedades de la luz, sin prestar atención a ninguna hipótesis por la cual esas propiedades puedan ser explicadas."[19] Creo que esta negación de una necesidad de hipótesis, dado su contexto, debe ser tomada en su valor aparente. De hecho, una teoría de difusión de la dispersión cromática no puede explicar el fenómeno: un grado desigual y constante de refrangibilidad debe ser necesariamente asignado a cada color.

Por lo tanto, advirtiendo a Pardies "abstenerse de considerar las hipótesis, como terrenos impropios para deducir una prueba,"[21] Newton propuso su definición de un rayo de luz:

> Por *luz*, por tanto, entiendo cualquier cosa o poder de una cosa (sea una sustancia o cualquier poder, acción o cualidad de ella) que procediendo en una línea recta desde un cuerpo luminoso es apta para excitar la visión. Y por los *rayos* de luz entiendo sus partes menores o indefinidamente pequeñas, las cuales son independientes una de otra; tal como lo son todos aquellos rayos que emiten los cuerpos luminosos ya sea simultánea o sucesivamente en líneas rectas. Pues ambas partes colaterales y sucesivas de la luz son independientes, dado que algunas de las partes pueden ser interceptadas sin las otras y ser reflejadas o refractadas separadamente en cualquier área.[22]

Como establecí previamente, creo que Newton no pretendía que esta definición fuera tomada como una definición ontológica que afirma la existencia de corpúsculos de luz, sino como una definición fenomenológica que afirma la propiedad observada de la luz de que cada "parte" de un haz es reflejada y refractada independientemente de cualquier otra "parte." Él no había

prejuzgado si las partes menores de la luz pueden ser aisladas, pues dice que "las partes menores o *indefinidamente pequeñas*, las cuales son independientes." La independencia física de las partes, no su tamaño, le interesan a Newton. Él introdujo su definición con fines didácticos para refutar las teorías de difusión en las que las "partes" de la luz no son independientes. Él mismo nos dice que este fue su propósito: "Habiendo sido argumentada esta [definición], la fuerza entera de la objeción yace en esto, que los colores pueden ser alargados por una cierta difusión de la luz más allá del orificio, lo que no se da en *la refracción desigual de los rayos diferentes* (*o de las partes independientes de la luz*)."[23]

Para refutar las teorías de difusión, Newton volvió a trazar entonces el argumento de su "nueva teoría" con una claridad y precisión que faltaban en su presentación original.[24] Primero notó que la ampliación del espectro no podría surgir de la irregularidad de los ángulos de incidencia de los rayos del sol, puesto que la longitud del espectro excedía su anchura muchas veces. Luego, añadiendo una observación de máxima importancia, concluyó,

> De hecho, de la forma de la imagen coloreada, que claramente no era oval, sino terminada el lado por dos líneas rectas paralelas, era evidente que fue formada con indefinidamente muchas imágenes del sol estiradas a través de refracción desigual y dispuestas en una serie continua; y por tanto los rayos que llegaban de las partes individuales del disco solar son dispersadas [*dispergi*] casi a través de la longitud completa de los colores; y, consecuentemente, desde similares [ángulos de] incidencias las refracciones son desiguales.[25]

Mientras esta observación de Newton es obvia para el lector moderno e implícita en su documento original, Hooke y Pardies no la notaron. En sus teorías, los rayos de una parte dada del sol son responsables por la producción de un color único; la parte roja del espectro viene de un borde del sol, y la azul del otro.[26] Newton, por el contrario, argumentó de esta observación que cada color surge en cada punto del haz, no solo en sus lados. Hooke y Pardies interpretarían entonces el espectro del sol como una imagen oval elongada del sol, en vez de considerarlo, como hizo Newton, como una serie infinita de imágenes circulares del sol

sobrepuestas, cada una de un color único. Si la observación de Newton no es admitida, la inadecuación de las teorías de difusión y la necesidad de refrangibilidad desigual no serán reconocidas.

Si la observación de Newton es aceptada –y Hooke y Pardies nunca la cuestionaron– es suficiente para demostrar la inadecuación de una simple teoría de difusión donde la difusión está confinada a los bordes del haz.[27] De cualquier manera, una teoría de difusión como la de Hooke, convenientemente modificada de forma que los rayos son difusos y dispersados en cada punto del haz incidente, aún podría parecer una alternativa viable.[28] Por lo tanto, el siguiente paso de Newton fue presentar una refutación de todas las teorías de difusión: "Está por tanto establecido que las refracciones son diferentes donde las incidencias son iguales. Pero el origen de esa diferencia debe ser investigado más allá: si se trata de una causa incierta e irregular o de alguna ley definida de acuerdo con la cual cualquier rayo es ajustado para sufrir alguna refracción definida."[29] Newton sugirió un gran número de posibles mecanismos para estas "causas inciertas e irregulares:" aspereza en la superficie del vidrio; venas de diferente densidad o un arreglo irregular de poros en el prisma; estremecimientos y mociones desiguales en las partes del éter, aire o vidrio; una expansión de los rayos hacia la región adyacente menos iluminada o sin iluminación del medio; una división y disipación de cada rayo en muchos rayos divergentes; "o cualquier otra difusión y expansión de la luz que podamos imaginar, que no proceda de una predisposición diversa de cada rayo para sufrir una refracción en alguna medida determinada y constante."[30]

Para demostrar que las refracciones desiguales no surgen de ninguna de estas causas inciertas e irregulares, Newton volvió al experimento del prisma paralelo que había presentado con cierta oscuridad en su documento original.[31] Dos prismas similares se ubican en posiciones orientadas opuestamente, esto es, con la base de uno paralela a la base del otro y adyacente a su vértice, de forma que "el segundo prisma, por su refracción contraria, devolverá los rayos y por lo tanto destruirá los efectos regulares

del primero, pero a través de la refracción repetida incrementará los efectos irregulares."[32] Si la dispersión fuera el resultado de cualquiera de estas causas irregulares, la difusión producida por el primer prisma debería ser al menos el doble de elongada que la que emerge de un solo prisma. Pero, de hecho, el haz emerge del segundo prisma como si no ocurrieran refractaciones. Por lo tanto,

> Debe concederse que la difusión de la luz causada por una refracción del primer prisma no surge de alguna de las causas previamente citadas o de cualquier otra irregularidad, sino debe ser atribuida solo a la diversa refrangibilidad de los diversos rayos, ya que cada rayo, habiendo sufrido por su disposición innata [*insita*] tanta refracción en el segundo prisma como en el primero, es reducido al paralelismo consigo mismo; y por tanto todos los rayos reasumen respectivamente la misma inclinación que tenían antes de las refracciones.[33]

Newton citó este mismo experimento en su carta a Hooke, donde el propósito didáctico de su definición de los rayos de luz es expuesto con claridad:

> ...si el primer prisma ha esparcido y disipado cada rayo en un número indefinido de partes divergentes, el segundo debe de la misma manera haber esparcido y disipado cada una de dichas partes en un ulterior número indefinido, por el cual la imagen debe haber sido más dilatada, al contrario de este evento. Y esto debe haber ocurrido porque esas partes lineales divergentes dependen no una de otra por la forma de su refracción, sino que son cada una de ellas rayos tan verdaderos y completos como lo fueron antes de su incidencia, como puede parecer al interceptarlos varias veces.[34]

Debe ser evidente que la gran debilidad de la teoría de difusión de la dispersión cromática de Hooke –o de cualquier teoría de difusión– era que no podía hacer frente a una segunda refracción, y es la segunda refracción la que Newton tan astutamente explota en todos sus experimentos con dos prismas. Hooke nunca consideró los efectos de una segunda refracción, ni dio cuenta en particular sobre cómo la parte difusa o "partida o rarificada" de su pulso oblicuo es refractada. Es difícil también concebir cómo Hooke podría explicar que un rayo de un solo color –asumiendo que uno pudiera ser aislado, de acuerdo con su teoría– no debiera ser dispersado ulteriormente en una segunda refracción; o, como

plantea Newton, "que los pulsos directos y uniformes deban ser partidos y perturbados por la refracción y aún los pulsos oblicuos y perturbados persistan sin ulterior partida o perturbación de las refracciones siguientes es... ininteligible."[35]

Aún más dañinos que estas críticas fueron los resultados del experimento de prismas cruzados con el que Newton confrontó enseguida a Hooke.[36] En este experimento (fig. 4), un haz de luz pasa a través de dos prismas, con el segundo prisma, *DH*, en posición transversa al primero, *ADC*. El espectro resultante *pt* se encuentra inclinado en relación al espectro *PT*, el cual sería producido por el prisma *ABC* solo, sin dispersión ulterior o cambios en el espectro ocurrente más que esta rotación. Este resultado contradice directamente la teoría de Hooke, pues de acuerdo con él el haz debe ser difundido por el segundo prisma y el espectro resultante debe ser el cuadro *?t?p*.[37] Este debe ser cuadrado, porque la segunda refracción toma lugar en un plano perpendicular al plano original de refracción, y en este plano el haz aún está en su estado original, no difuso.

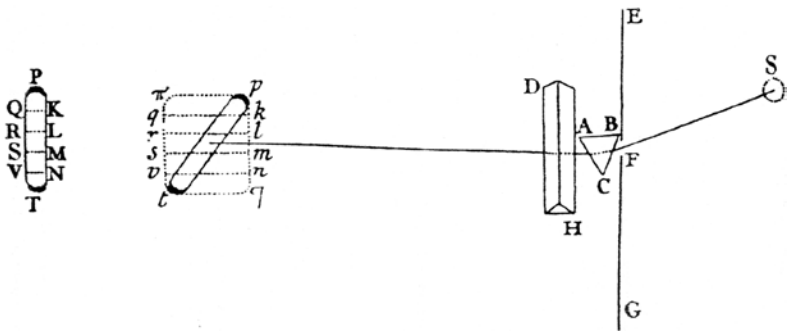


Figura 4. Experimento de prismas cruzados de Newton, tomado de *Opticks* (1704), libro I, parte I, placa III.

En la reunión de la Royal Society que siguió a la lectura de la carta de Newton a Hooke, este presentó su propio informe sobre

los experimentos de Newton con dos prismas.[38] Primero se dirigió al experimento de prismas cruzados. Para su sorpresa, encontró que los resultados precisamente como Newton los había expuesto: "Encontré que todos los colores mencionados serían refractados por segunda ocasión, y aún mantendrían sus varios colores distintos en el mismo orden sin entremezclar sensiblemente cualquier otro color con alguno de ellos."[39] De igual manera encontró la forma y posición del espectro exactamente como había reportado Newton. Con gran disgusto, Hooke se vio forzado a concluir que esto "parece a primera impresión confirmar la teoría de los colores y la luz del señor Newton; pero todavía no lo considero un *crucis experimental*, como posiblemente podré demostrar aquí."[40] Huelga decir que Hooke terminó su reporte sin haber sido capaz de demostrarlo. Sin embargo realizó otros dos experimentos con dos prismas, incluyendo una variante del experimento del prisma doble, y encontró que también apoyaban a Newton.

El que Hooke confundiera el experimento del prisma cruzado con el verdadero *crucis experimental* de Newton indica la crisis que los experimentos con dos prismas presentaban a las teorías de difusión. El *crucis experimental* propio de Newton confrontó a las teorías de difusión con otro grave problema, a saber, el de aislar una haz de luz monocromático, o un haz de un solo color. En el *crucis experimental* de Newton, una haz de luz ya refractado una vez pasa a través de una abertura, desde donde emerge un haz angosto de un solo color, el cual es luego refractado por segunda ocasión. En la teoría de Hooke, no debería emerger un haz monocromático de esta abertura, dado que todo rayo físico contiene potencialmente todos los colores, y en particular contiene los dos colores principales, rojo y azul, en cualquier lado.[41] Un rayo exhibe estos colores en sus lados solo cuando bordea la parte sin iluminar del medio y cuando no está rodeado por rayos vecinos. Cuando el haz pasa a través de una abertura, sus rayos vecinos son detenidos, y la parte que pasa a través debe cambiar de color, exhibiendo lo que previamente eran tan solo colores potenciales, pues ahora el rayo bordea el medio sin iluminar.

En sus cartas a Hooke y Pardies, Newton alude al problema de aislar un haz monocromático en las teorías de difusión pero no lo discute explícitamente. Sin embargo, en sus *Lectiones opticae* critica a Hooke en este punto, aunque sin citar su nombre. En la sección "Observaciones contra la hipótesis de los filósofos," Newton observó,

> De hecho, en esas hipótesis se ha asumido que la luz refractada siempre debe terminar en aquellos lados sobre los que ocurre la refracción con azul y violeta; puesto que la rotación de las bolas pequeñas, de acuerdo con el punto de vista de Descartes, o las partes delanteras del pulso etéreo que vibran oblicuamente según ciertas otras hipótesis [la de Hooke], siempre son impedidas y debilitadas sobre esos lados por el medio vecino en descanso. Pero, no obstante, se ha demostrado... [que al interceptar algunos de los rayos] se puede destruir el violeta y el azul y causar que el verde o el amarillo o hasta el rojo permanezca en esos lados externos sobre los que ocurre la refracción.[42]

Creo que Newton tuvo en mente esta dificultad de aislar un haz monocromático en las teorías de difusión cuando formuló su definición de un rayo de luz como las "partes" de luz independientes.[43] Tanto en la teoría de Hooke como en la Pardies –y también en la de Descartes, aunque no es una teoría de difusión– el color de un rayo es relativo, o *dependiente* del estado del éter circundante o de los rayos vecinos; mientras que en la teoría de Newton los colores y el grado de refrangibilidad son "propiedades *originales* y *connatas*,"[44] independientes de los rayos vecinos. Aunque en este documento me he dedicado principalmente a la definición de Newton de un rayo de luz y la dispersión cromática, es obvio que su definición tenía también profundas implicaciones para una teoría de los colores. En efecto, la definición de Newton sostiene la existencia de haces de luz monocromáticos, los cuales habían sido admitidos verbal pero no formalmente en las teorías de Hooke y Pardies. Sus teorías del color fueron formuladas para el espectro de colores producido en la refracción y no para colores individuales, aislados.

Ahora que hemos visto la definición de Newton dentro del contexto de su refutación de las teorías de difusión, debe ser

evidente que tendremos que aceptar las propias afirmaciones de Newton: su definición está libre de cualquier hipótesis sobre la naturaleza de la luz (el párrafo que precede a la definición);[45] introdujo su definición para refutar las teorías de difusión de la dispersión cromática (el enunciado que sigue inmediatamente a la definición).[46]

Pero, si no son átomos, ¿qué son las "partes" de la luz? Aquí Sabra nos ha proporcionado una valiosa observación, pues la definición de un rayo de luz de Newton tiene sus raíces en su atomismo. No hay duda de que en sus primeros años de descubrimiento óptico, como incluso a lo largo de su vida, Newton creyó que la luz consistía en la emisión de corpúsculos de luz o átomos.[47] El origen atomístico de su definición en evidente desde el inicio de la lectura inaugural de sus *Lectiones opticae*, donde Newton nos pidió "imaginar que a lo largo de esta línea OF fluyen continuamente rayos solares sucesivos, de tal forma que chocan con el punto F uno tras otro y, en le mismo sitio, son refractados en un medio más denso."[48] En este pasaje, donde Newton adelantó por vez primera su descubrimiento de la dispersión cromática públicamente, quería acentuar, contrario a la "ley recibida," que en el mismo ángulo de incidencia y en el mismo punto de refracción hay muchos rayos refractados diferentes, cada uno exhibiendo un color distinto. Como hemos visto ya por su refutación de las teorías de difusión, la evidencia experimental no permitía a Newton admitir que cada rayo incidente era partido o difundido en muchos rayos refractados en el punto de refracción. Por lo tanto imaginó, naturalmente, que los rayos "sucesivos" (átomos) que fluyen a lo largo de la misma línea de incidencia (un rayo geométrico) se refractan desigualmente.

En un pasaje posterior en *Lectiones opticae*, Newton introduce una vez más este concepto de un rayo, y según entiendo es el único otro pasaje en que lo hace. Más aún, aplica su concepto en el mismo contexto en que lo hiciera previamente, es decir, para enfatizar que en el mismo punto y ángulo de incidencia se producen muchos rayos refractados, cada uno de diferente color.

Aún así, en contraste con el pasaje anterior, Newton ahora expande su concepto de un rayo para permitir una interpretación de onda:

> Si aún así alguien tiene dificultad para imaginar muchos rayos sucesivos en la misma línea, dejémoslo imaginar en lugar de la línea OF un pequeño espacio en un sentido físico equivalente a la línea en la que fluyen muchos rayos paralelos pero indefinidamente cercanos, de forma tal que sean tomados por sensiblemente coincidentes. Habiendo argumentado esto, sabemos por las lecturas 4, 5, 6 que estos rayos no deben ser concebidos todos como similares, sino como una mezcla de rayos que exhiben rojo, amarillo, verde, azul y morado con todos sus grados intermedios.[49]

Finalmente, debe quedar claro lo que Newton quiere decir por las "partes" de la luz: las "partes" son los rayos de diferente color, sean estos constituidos por átomos o rayos como son concebidos en una teoría de onda de la luz. Y estas "partes" o rayos son cada uno refractado desigualmente, de acuerdo con una ley ajustada, independientemente de todos los otros rayos. Entonces, según Newton, cualquier rayo geométrico, al ser considerado físicamente, está compuesto ya sea por una sucesión de átomos de luz diversos o por un montón infinitamente pequeño de rayos diversos, como se concibe en una teoría de onda, cada uno de los cuales es refractado de distinta manera.

Este concepto de un rayo, el cual Newton introdujo primero en sus *Lectiones opticae* como una sucesión de átomos pero luego modificó para abarcar la teoría de onda, yace tras la definición posterior de un rayo de luz en su carta a Pardies. Esto asume, por supuesto, que la versión temprana de las *Lectiones opticae*, de la que he tomado todas mis citas, es de fecha previa a la disputa de Newton con Pardies y Hooke en 1672. Incluso, en el apéndice de este documento proporciono evidencia ulterior del argumento de Westfall de que los manuscritos tempranos datan de hecho de antes de finales de 1671. En consecuencia, aunque la definición de Newton de un rayo de luz se originó en parte en su atomismo, Newton reconoció aún antes de su disputa que no necesitaba restringir su definición, y la extendió para abarcar la nueva teoría de onda de la luz. Los principales oponentes de Newton, Pardies y Hooke, apoyaban una teoría de onda de la luz, pero Newton tenía

la intención de que su definición se aplicara a todas las teorías de difusión, no solo a aquellas derivadas de una teoría de onda, pues una "difusión o expansión puede ser concebida de acuerdo con cualesquiera otras hipótesis en las que la luz se supone un poder, acción, cualidad o sustancia cierta."[50] De hecho, la definición de Newton y sus argumentos antidifusión se dirigían tanto sobre una teoría de emisión de la luz como la de Grimaldi como sobre las teorías de onda de Hooke y Pardies.[51] Newton intentaría continuamente aplacar a sus oponentes demostrando que su teoría de los colores no dependía de una teoría de emisión de la luz, pero había un punto en el que no rendiría –la luz blanca es una mezcla heterogénea de todos los colores. Mientras la definición de Newton está libre de una hipótesis sobre la naturaleza de la luz, sea una teoría de emisión o de onda, no está libre de una hipótesis acerca de la naturaleza de la luz blanca y los colores, pues la definición y sus aplicaciones asumen que las "partes" o colores de la luz están presentes antes de la refracción. Entonces, en lo que la definición de Newton ha estado libre del cargo de "dogmatismo" como una definición de un corpúsculo de luz o átomo, su "dogmatismo" reemerge en la presunción de que los colores están presentes en la luz blanca antes de la refracción.

Newton formuló después otra definición de un rayo de luz para una reimpresión anotada pero no publicada de su documento original, "Una nueva teoría sobre la luz y los colores."[52] En una nota sobre "si la luz es un cuerpo," Newton observó que generalmente se hace "una distinción impropia" entre dos "hipótesis mecánicas" sobre la naturaleza de la luz,

> ...dentro de aquellas en que la luz tiene un cuerpo y aquellas en que tiene la acción de un cuerpo, entendiendo la primera de los cuerpos en trayecto a través de un medio, la última de moción o presión propagada a través de este... Mientras la luz es igualmente un cuerpo o la acción de un cuerpo en ambos casos. Si se llama a sus rayos los cuerpos que trayectan en el primer caso, entonces en el caso posterior son los cuerpos los que propagan la moción de uno a otro en líneas derechas hasta que la última golpea el sentido. La única diferencia es que en un caso un rayo es un cuerpo, y en el otro muchos.[53]

Aunque Newton también compuso su definición con propósitos polémico-didácticos, esta muestra su intento por reafirmar a sus oponentes que su teoría de la luz y los colores no dependía en forma alguna de una teoría de emisión de la luz.

Newton volvió una vez más al concepto de un rayo de luz en la *Óptica* (1704), que comienza con una definición similar aunque no idéntica a la formulada primero para Pardies.[54] Aquí coincido con el punto de vista de Sabra de que la definición de Newton de un rayo de luz es una definición de un corpúsculo de luz o átomo. Haré, sin embargo, el argumento aún más sólido de que esto no fue falto de intención de parte de Newton, puesto que ahora descartó la referencia a las "partes indefinidamente pequeñas" y se refirió solo a las "partes menores." Argumentaré aún que Newton también tenía en mente la vieja interpretación como una clara señal de que las teorías de difusión que tantas angustias le causaran treinta años antes no serían toleradas. Creo que es claro que estas teorías aún le dolían, en vista de que en *Óptica* les dedica aún más atención que antes al refutar las teorías de difusión, que presumiblemente habían muerto hacía tiempo.[55]

Apéndice: las fechas de los manuscritos de *Lectiones opticae*

Existen dos versiones de *Lectiones opticae*, pero de entre las dos no hay duda que MS Add. 4002 es la más temprana y sirvió como base para la revisada MS Dd.9.67.[56] Newton presentó *Lectiones opticae* entre 1669-1670 y 1672, y ambos manuscritos coinciden en estas fechas. Sin embargo difieren sobre las fechas en que se presentaron lecturas específicas.[57] Lo que me interesa en este documento es si la versión temprana fue compuesta antes de 1672. Westfall ha argumentado como plausible que el manuscrito temprano data de antes de finales de 1671, cuando Newton se encargó de revisar sus lecturas.[58] Creo que puedo confirmar de manera independiente la fecha de Westfall. Argumentaré específicamente que al menos las lecturas 1 a 8 de la versión temprana[59]

fueron compuestas antes de 1672 y de la disputa de Newton con Hooke y Pardies, mientras la segunda versión es contemporánea a la disputa o posterior a ella. Argumentaré esto desde el hecho de que tanto las versiones tempranas como el documento de 1672 virtualmente no contienen argumentos explícitos contra las teorías de difusión, mientras las versión posterior, junto con las cartas a Hooke y Pardies, contienen cierto número de ataques contra esas teorías.

Aunque tanto el experimento del prisma paralelo como el del prisma cruzado son descritos por Newton en las *Lectiones opticae* tempranas, él aún no las dirige en contra de las teorías de difusión. Asume primero una postura antidifusión durante la disputa con Hooke y pardies. En la presentación del experimento del prisma paralelo en las primeras *Lectiones opticae*, como en el documento de 1672, las teorías de difusión no son mencionadas, pero en la revisión se añadieron dos párrafos en los se las refuta explícitamente; y el experimento del prisma cruzado también se invoca aquí, tal como está en la disputa con Hooke y Pardies.[60] En la versión temprana, el experimento del prisma cruzado se usa solo para establecer la correspondencia uno-a-uno entre los colores y el grado de refrangibilidad, mientras que en la versión revisada se añadió un párrafo en el que son explícitamente rechazadas las teorías de difusión.[61] Aún más, en el pasaje citado arriba, donde Newton demuestra que la teoría de Hooke no admite el concepto de un haz monocromático, Newton no menciona a Hooke por su nombre; en la versión revisada Hooke es atacado por su nombre.[62] Por estas razones, entonces, argumento que por lo menos las lecturas 1 a 8 de la versión temprana de *Lectiones opticae* (4002) fueron compuestas antes de 1672 y de la disputa de Newton con Hooke y Pardies, y que la versión posterior (Dd.9.67) fue compuesta durante o después de la disputa.

N O T A S

* Recibido en noviembre de 1973/aceptado en junio de 1974.
Escuela de Física y Astronomía, Universidad de Minnesota, Minneapolis, Minnesota, 55455. Un borrador previo de este documento fue enviado a la Decimoquinta Reunión Anual del Junto del Medio-oeste de la Historia de la Ciencia, Madison, Wisconsin, el 6 de abril 6 1972. La investigación sobre *Lectiones opticae*, utilizada en la revisión de este documento, fue apoyada por una delegación investigadora de la Facultad de Verano de la Universidad de Minnesota en 1973. Deseo agradecer a Johannes Lohne, Roger Stuewer y Richard Westfall por sus perspicaces críticas sobre este documento.

1 De Newton a Henry Oldenburg, para Robert Hooke, 11 de junio de 1672, H.W. Turnbull: *The Correspondence of Isaac Newton*, Cambridge, Cambridge Press University, 1959, vol. I, p. 175.

2 De Newton a Oldenburg, para Ignace Gaston Pardies, 10 de junio de 1672, *ibid*., p. 168; y de Newton a Oldenburg, para Hooke, 11 de junio de 1672, *ibid*., p. 175. Ver A.I. Sabra, "Newton and the 'Bigness' of Vibrations," *Isis*, 1963, 54:267-268.

3 Documento de Newton, "A New Theory about Light and Colors," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 9 de febrero de 1671/1672, n. 80, pp. 3075-3087, aparece en facsímil en Bernard Cohen, *Isaac Newton's papers and Letters on Natural Philosophy*, ed. I, Cambridge, Mass., Harvard University Press, 1958, pp. 47-59. Pardies envió su primera carta a Oldenburg para Newton el 30 de marzo de 1672 (*Correspondence*, v. I, pp. 130-134), y Newton respondió el 13 de abril de 1672 (*ibid*., pp. 140-144). (Las fechas de las cartas de Pardies han sido convertidas al estilo antiguo para corresponder con las fechas de Newton). La segunda carta de Pardies para Newton fue escrita el 11 de mayo de 1672 (*ibid*., pp. 156-159), y Newton respondió el 10 de junio de 1672 (*ibid*., pp. 163-171). Todas estas cartas fueron publicadas en las *Philosophical Transactions* y reimpresas con traducción en *Papers & Letters*. La crítica de Hooke a la teoría de newton fue leída a la Real Sociedad el 15 de febrero de 1672 (*ibid*., pp. 171-193). Sólo la carta de Newton fue impresa en *Phil. Trans.*, pero ambas están incluidas en *Papers & Letters*. Ver L. Rosenfeld, "La théorie des couleurs de newton et ses adversaires," *Isis*, 1927, *9*:44-65; Thomas S. Kuhn, "Newton's Optical Papers" en *Papers & Letters*, pp. 27-45; Richard S. Westfall, "Newton and His Critics on the Nature of Colors," Archives Internationales d'Histoire des Sciences, 1962, *15*:47-58; y Westfall, "Newton's Reply to Hooke and the Theory of Colors," *Isis*, 1963, *54*:82-96.

4 *Correspondence*, v. I., p. 164. Aquí, como en todo este documento, he basado mi traducción en la de *Phil. Transl. Abridged*, Charles Hutton ed.,

et al., 18 vols., Londres, 1809, que fue reimpresa en *Papers & Letters*, p. 106. He hecho, sin embargo, numerosos cambios sobre esta libre pero generalmente confiable traducción.

5 "...los rayos de Newton fueron siempre aquellos de la teoría copuscular y les fue negado explícitamente el significado que hubieran tenido en una teoría de onda. Fueron, en particular, concebidos como entidades discretas que podían, en principio ser aisladas una de otras. En consecuencia, a la doctrina de Newton sobre la heterogeneidad original de la luz expresada en términos de dichos rayos le fue negada, *a priori*, una interpretación de onda." (A.I. Sabra, *Theories of Light from Descartes to Newton*, Londres, Oldbourne, 1967, p. 288).

6 El capítulo 11 de *Theories of Light*, de Sabra, se titula "Newton's Dogmatism and the Representation of White Light."

7 "...debido a su concepción sobre lo que constituía un rayo de luz, Newton estaba de hecho comprometido con un punto de vista corpuscular. *Newton no estaba consciente de esto*, pues presentó su concepto como una doctrina completamente neutral ante cualquier posible hipótesis explicatoria respecto a la naturaleza de la luz" (*ibid*., p. 284; las cursivas son del autor).

8 E.g., Vasco Ronchi, *The Nature of Light: An Historical Survey*, trad. V. Barocas, Londres, Heinemann, 1970, p. 165; cree que esta es una definición de un "quantum" de luz.

9 Ver *Correspondence*, v. I, p. 188, n. 1.

10 *Ibid*., p. 131; *Papers & Letters*, p. 87.

11 *Correspondence*, v. I, p. 157; *Papers & Letters*, pp. 104-105.

12 *Micrographia: Or Some Physiological Descriptions of Minute Bodies Made by Magnifying Glasses with Observations and Inquiries thereupon*, Londres, 1665; reimpresión en facsímil, Nueva York, Dover, 1961. "Observ. IX. De los colores observables en vidrio de Muscovy y otros cuerpos delgados," esp. pp. 56-59. Para un estudio más comprensivo de la óptica de Hooke, incluyendo una explicación de la distinción de Hooke entre los rayos físicos y matemáticos, ver mi "Kinematic Optics: A Study of the Wave Theory of Light in the Seventeenth Century," *Archive for History of Exact Sciences*, 1973, *11*:134-266, en especial la sec. 4.1, "Hooke's Theory of Light and Color."

13 *Micrographia*, pp. 62-63.

14 Newton después criticó agudamente a Hooke en este punto: "Entiendo... poco por qué debe partirse sólo en un ángulo tan pequeño, y no mejor esparcirse y dispersarse a través del ángulo completo de refracción" (*Correspondence*, v. I, p. 176).

15 *Ibid*., p. 111.

16 *Micrographia*, p. 63.

[17] *Ibid*.

[18] Entre 1669/1670 y 1672, Newton disertó en la Universidad de Cambridge sus *Lecturas Lucasianas* sobre óptica y expuso su descubrimiento previo de la dispersión cromática y su teoría sobre la naturaleza de la luz blanca y los colores. Existen dos versiones manuscritas de estas *Lectiones opticae* en la Biblioteca de la Universidad de Cambridge, de las cuales MS Add. 4002 es anterior a MS Dd.9.67; comento sus fechas en el apéndice. Para una descripción de las *Lectiones opticae* ver Westfall, "Newton's Reply to Hooke." Un facsímil de MS add 4002 ha sido publicado recientemente: *The Unpublished First Version of Isaac Newton's Cambridge Lectures on Optics, 1670-1672*, Cambridge, The University Library, 1973.

[19] *Correspondence*, v. I, p. 164; *Papers & Letters*, p. 106.

[20] *Ibid*.

[21] *Correspondence*, v. I, p. 164.

[22] *Correspondence*, v. I, p. 164; *Papers & Letters*, pp. 106-107.

[23] *Correspondence*, v. I, p. 164; *Papers & Letters*, p. 107; cursivas del autor.

[24] Creo que muchas de las dificultades de Newton con Hooke y Pardies pudieron haberse evitado si el documento original de Newton no hubiera sido tan oscuro. Por ejemplo, no había un solo diagrama en el documento entero. Tras terminar su disputa con Hooke y Pardies, el mismo Newton reconoció esta falla: "Tocante a la teoría de los colores, estoy en capacidad de creer que algunos de los experimentos pueden parecer oscuros por razón de la brevedad con que los escribí, los cuales debieron haber sido descritos en mayor extensión y explicados con esquemas, si hubieran sido considerados para el público" (de Newton a Oldenburg, 8 de julio de 1672, *Correspondence*, v. I, p. 212).

[25] *Ibid*., p. 165.

[26] Hooke: *Micrographia*, p. 58. Pardies no es explícito en su interpretación, pero puede deducirse de la teoría con esbozó para Newton y de su enunciación que sus puntos de vista son similares a los de Hooke (cita n. 11, arriba). El punto de vista de que los colores producidos en los bordes de un haz era el tradicional antes de los descubrimientos de Newton; ver Richard S. Westfall: "The Development of Newton's Theory of Color," *Isis*, 1962, *53*:339-358.

[27] La forma real del espectro que Newton debió haber observado –ya fuera oval o con bordes semicirculares y lados rectos– es una cuestión difícil. Sin embargo, no es relevante para mi punto inmediato, puesto que ni Hooke ni Pardies cuestionaron la observación de Newton. Ver Kuhn en *Papers & Letters*, pp. 33-35, y Johannes Lohne, "Newton's 'Proof' of the Sine Law and his Mathematical Principles of Colors," *Arch. Hist. Exact Sci.*, 1961, *1*:396-397.

[28] De hecho, Newton tenía en mente la teoría de Descartes sobre las colas de los cometas, la cual depende también de una especie de difusión; ver Correspondence, v. I, p. 178, y cita n. 19, arriba. Newton estaba muy interesado en la teoría de la luz de Descartes durante estos años tempranos de su carrera. Para un análisis de la teoría de la colas de los cometas de Descartes y su relación con la óptica y la hidrostática de Newton, ver mi "Light, Pressure, and Rectilinear Propagation: Descartes' Celestial Optics and Newton's Hydrostatics," *Studies in History and Philosophy of Science*, 1974, *5*:239-296.

[29] *Correspondence*, v. I, p. 165.

[30] *Ibid*.

[31] "New Theory," p. 3076; *Papers & Letters*, p. 48.

[32] *Correspondence*, v. I, p. 165.

[33] *Ibid*., p. 166.

[34] *Ibid*., p. 178; cursivas del autor.

[35] *Ibid*., p. 177.

[36] *Ibid*., pp. 178-179.

[37] Newton investigó si los prismas cruzados "harían que la imagen larga se convirtiera en cuatro cuadros por las refracciones que cruzan aquellos que se han dibujado la imagen redonda en una larga. Pues si, de entre otras irregularidades, la refracción del primer prisma lo hizo al partir la dilación de un rayo lineal en uno superficial, las refracciones cruzadas de ese segundo prisma deben por partición ulterior dilatar y dibujar ese rayo superficial en un sólido piramidal. Pero en la comprobación encontré lo contrario" (*ibid*., p. 178).

[38] 19 de junio, 1872, *ibid*., pp. 195-197.

[39] *Ibid*., p. 195.

[40] *Ibid*.

[41] Hooke escribió que los rayos "que vienen de cualquier parte de un cuerpo luminoso, son supuestos por alguna refracción suficiente antes de penetrar en el ojo, de tener sus pulsos oblicuos a su progresión, y en consecuencia cada rayo tiene dos propiedades potencialmente sobreinducidas, o colores, *viz.* un *rojo* por un lado y un *azul* por el otro, no obstante lo cual nunca son realmente manifiestos, excepto cuando éste o aquel rayo tiene un lado o el otro bodeando sobre un *medio* oscuro o sin mover" (*Micrographia*, pp. 63-64). Ver también el pasaje de la cita n. 17, arriba.

[42] "Ex illis enim positis, refracta luz ad eas semper partes cum cæruleo et violaceo terminanda est, versus quas fit refractio; quandoquidem gyrationes globulorum ex opinione Cartesij, vel partes anteriores pulsuum Ætheris obliquè vibrantis ex aliâ quadam Hypothesi, per viciniam quiescentis Medij ad eas semper partes impediuntur et hebescunt. ttamen ostensum est... possis violaceum et cæruleum tollere et efficere ut viridis vel flavus aut

etiam ruber ad eas partes maneat extimus versus quas refractio peragitur" (MS Add. 4002, lect. 8, sec. 92, pp. 66-67). Newton hizo algunos cambios estilísticos insignificantes en este pasaje.

43 Después de presentar el *crucis experimental* a Pardies, Newton le recordó que las propiedades de la luz deben ser "exploradas por éste y por experimentos similares al considerar sus rayos ya sea como partes colaterales o sucesivas de ésta, de acuerdo con lo cual hemos encontrado por su independencia que son distinto uno de otro" (*Correspondence*, v. I, p. 167; *Papers & Letters*, p. 108).

44 "New Theory," p. 3081; *Papers & Letters*, p. 53.

45 "De donde he juzgado que uno debe rechazar aquí la consideración de las hipótesis, por ser terrenos impropios para deducir una prueba, y que la naturaleza de la objeción debe ser considerada de manera abstracta, de forma que pueda recibir una refutación más completa y general" (*Correspondence*, v. I, p. 164).

46 Cita n. 23, arriba.

47 Ver, e.g., A.R. Hall, "Sir Isaac Newton's Note-book, 1661-5," *Cambridge Historical Journal*, 1948, *9*:248, y Richard S. Westfall, "Isaac Newton's Coloured Circles twixt two Contiguous Glasses," *Arch. Hist. of Exact Sci.*, 1965, *2*:181-196.

48 "Concipe etiam radios solares per istam lineam OF sibi continuò successivos fluere, ita ut alij post alios in punctum F impingant, ibidemque in medium densius refringantur" (MS Add. 4002, lect. 1, sec. 2, p. 2). Quiero agradecer a Johannes Lohne por llamar mi atención sobre este pasaje. En la versión posterior revisada, Newton añadió: "Vel si mavis, finge parallelos radios indifinitè parùm distare ab OF, et incidere in puncta ipsi F vicinissima" (MS Dd.9.67, pt. I, lect. 1, sec. 2, p. 2). Con esta adición, Newton llevó esta sección a concordar con un pasaje posterior en MS Add. 4002, citado en la nota siguiente, e hizo su concepto de una rayo compatible con la teoría de onda de la luz.

49 "Plures autem radios in eâdem rectâ successivos siquis ægrèconcipiat: vic lineæ OF cogitet exiguum spatium in rebus physicis æquipollens lineæ, in quo plures paralleli radij fluant, sed indefinitè parùm distantes, ut quoad sensum pro coincidentibus habeantur. Quibus præmissis constat ex Lect. 4, 5, et 6 quòd isti radij non concipiendi sunt omninò similes, sed mixtura rubriformium, flaviformium, viridiformium, cæruliformium, et purpuriformium, cum omnibus eorum gradibus intermedijs" (MS Add. 4002, lect. 7, sec. 78, p. 57). Newton insertó la frase "in rebus physicis;" sus demás cambios son insignificantes. *Nota añadida en prueba*: dado que este documento fue preparado para publicación, encontré otro pasaje en MS Add. 4002 (lect. 2, sec. 20, p. 16) donde Newton usa este concepto de un rayo.

[50] *Correspondence*, v. I, p. 164; *Papers & Letters*, p. 106. Ver también la definición de Newton sobre la luz que precede inmediatamente a su definición de un rayo de luz, cita n. 22, arriba.

[51] Grimaldi tendió hacia una teoría de la luz en la que los corpúsculos de luz no eran discretos e independientes sino formados por un fluido cuyo color se doblaba o se difundía alrededor de los obstáculos. Ver Francesco Maria Grimaldi, *Physico-mathesis de lumine, et iride*, Bononiae, 1665; reimpresión fascimilar, Bologna, Arnaldo Forni ed., 1963; "Propositio. II. Lumen videtur esse quid fluidu, perquàm clerrimè, & saltem aliquando etiam undulatim, fussum per corpora diaphana" (la luz parece ser algo fluido transmitido a través de cuerpos transparentes muy rápidamente y por lo menos a veces ondulante), pp. 12-23. Emanuel Maignan fue otro que apoyó este difundido punto de vista: "la luz es un cuerpo no desconectado como un simple heap del polvo más fino, pero dada su gran sutileza se junta, como el agua, el aire, el fuego y otros fluidos de este tipo" (*Perspectiva horaria sive de horographia gnomonica tum theoretica, tumpractica libri quatuor*, Romae, 1648, pp. 629-630).

[52] Derek J. de Solla Price descubrió esta reimpresión abortada, y fue publicada por I. Bernard Cohen, "Versions of Isaac Newton's First Published Paper," *Archs. Int. Hist. Sci.*, 1658, *11*:357-375.

[53] *Ibid*., pp. 364-365.

[54] "Defin. I. Por los rayos de la luz entiendo sus partes menores, y aquellas también sucesivas en las mismas líneas como contemporáneas en varias líneas. Por eso es manifiesto que la luz consiste de partes tanto sucesivas como contemporáneas; porque en el mismo lugar se puede detener aquel que viene en un momento y dejar pasar al que viene después; y al mismo tiempo se le puede detener en cualquier lugar y dejarlo pasar en cualquier otro. Pues esa parte de la luz que es detenida es la misma que aquella que se deja pasar. A la menor luz o parte de luz que puede ser detenida sola sin el resto de la luz, o propagada sola, o hacer o sufrir cualquier cosa sola, que el resto de la luz no hace o no sufre, yo le llamo rayo de luz." (*Opticks: Or a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light*, Londres, 1704; reimpresión facsimilar, Bruselas, Culture et Civilisation, 1966, pp. 1-2).

[55] Lib. I, pt. I, prop. 2, exp. 5, pp. 23-30. Ver también lib. I, pt. I, prop. 5, "la luz homogénea es refractada regularmente sin ninguna dilatación sin partición o golpe de los rayos, y la visión confusa de los objetos vistos a través de cuerpos refractantes por luz heterogénea surge de refrangibilidad diferente o de varias clases de rayos" (pp. 51-53).

[56] Westfall: "Newton's Reply to Hooke," p. 83.

[57] La versión temprana (MS 4002) ostenta las fechas "Ene. 1669 [i.e., 1669/1670]" para la lect. 1 y "Jul. 1670" para la lectura 9. En la versión

posterior (Dd.9.67), la lect. 9 fue supuestamente enviada en "Oct. 1670," pero esta lect. 9 es completamente distinta de la lect. 9 de la versión previa. Por otro lado, las lects. 3 a 8 de la versión temprana fueron enviadas después de octubre de 1671, de acuerdo con la versión posterior; ver *The Mathematical Papers of Isaac Newton*, Derek T. Whiteside ed., Cambridge, Cambridge University Press, 1969, v. III, pp. 435-437.

58 Westfall: "Newton's Reply to Hooke," pp. 83-84.

59 La primera parte de las tempranas *Lectiones opticae*, lects. 1 a 8, trata el descubrimiento de Newton de la dispersión cromática y su teoría de los colores, y la segunda parte, lects. 9 a 18, trata la óptica geométrica. Todas mis citas a este versión temprana de las *Lectiones opticae* han sido acerca de la parte 1.

60 MS Add. 4002, lect. 2, sec. 22, pp. 16-17; MS Dd.9.67, pt. I, lect. 3, sec. 23, pp. 13-15.

61 MS Add. 4002, lect. 3, sec. 32, pp. 24-25; MS Dd.9.67, pt. II, lect. 2, sec. 23, pp. 5-7.

62 MS Dd.9.67, pt. II, lect. 10, p. 60, y cita n. 42, arriba.

La óptica de Newton y el atomismo

Alan E. Shapiro

Alan E. Shapiro, "Newton's optics and atomism", pp. 227-255, in I. Bernard Cohen, George E. Smith (eds), *The Cambridge Companion to Newton*, (2002).
© Cambridge University Press 2002, translated with permission.

Después de sus primeras publicaciones sobre óptica en 1672 Newton era identificado por sus contemporáneos y generaciones posteriores como un defensor de la teoría de la luz corpuscular o de emisión, en que se asume que la luz consiste en corpúsculos, o átomos, emitidos desde una fuente luminosa tal como el sol. Aunque es verdad que Newton creyó en una teoría corpuscular, que la utilizó al desarrollar muchos de sus experimentos y teorías sobre óptica, y que argumentó con vigor en contra de la teoría ondulatoria de la luz, nunca creyó que fuese una verdad científica demostrada y la consideró solo una hipótesis probable. Esta distinción explica por qué, por ejemplo, nunca emprendió una explicación sintética de la teoría de emisión y la evitaba en sus explicaciones públicas de sus teorías científicas. Para comprender el uso y abogacía de Newton por el atomismo en su óptica es necesario comprender sus ideas sobre las hipótesis y sobre la ciencia.

Hipótesis en la ciencia de Newton

Desde el inicio de su carrera científica Newton estuvo interesado por establecer una ciencia nueva, más veraz, para reemplazar la ciencia contemporánea, que sentía estaba llena de "suposiciones y probabilidades".[1] Creía que podría establecer una ciencia más veraz al desarrollar teorías matemáticas y al basar sus teorías en propiedades descubiertas por medio de experimentación. Para establecer una ciencia más veraz, Newton insistía en que no se debe "mezclar suposiciones con certezas".[2] Para evitar comprometer principios demostrados rigurosamente por hipótesis, desarrolló las técnicas de llamar como tales a las hipótesis y apartarlas, como en su "Hipótesis que explica las propiedades de la luz tratadas en varios de mis ensayos" en 1675, o con las Cuestiones adjuntas a *Óptica* en 1704 y en ediciones subsecuentes.

Como parte de su campaña para reformar la ciencia, Newton continuamente protestaba en contra de hipótesis, esto es, contra explicaciones causales conjeturales. Sus condenaciones de las hipótesis –siendo la más famosa su "hypotheses non fingo" ("no invento hipótesis") en *Principios* (1687)– siempre apuntan a la preservación de la veracidad de los principios científicos más que objetarlos al uso de hipótesis en sí mismos. Newton sostenía que las hipótesis sin ningún apoyo experimental, tal como los vértices cartesianos, no tienen lugar en la ciencia, pero aquellas basadas en alguna evidencia experimental, aunque sean insuficientes para establecerlas como principios demostrados, podrían ser utilizadas para comprender propiedades ya descubiertas o para dar ideas a nuevos experimentos. La teoría corpuscular de la luz entró en la segunda categoría.

Newton creía que al formular sus teorías de manera fenomenológica, en términos de propiedades observadas en experimentos o en principios deducidos de ellos, sin ninguna explicación causal (hipótesis) de tales propiedades, podría desarrollar una ciencia más veraz. Aunque consideraba las explicaciones causales como deseables, nunca tuvieron un papel esencial o necesario en su ciencia. Sin embargo, como veremos, en su trabajo privado Newton utilizó hipótesis para desarrollar teorías y predecir propiedades nuevas. Cuando usó causas hipotéticas tales como corpúsculos de luz y el éter en esta forma, las purgó (o, al menos, intentaba hacerlo) de su trabajo público y reformuló sus teorías en términos de "propiedades" descubiertas por experimentación tales como periodicidad y refrangibilidad desigual. Parece que Newton jamás cuestionó la posibilidad de construir una ciencia libre de hipótesis. Haber negado tal posibilidad hubiese sido equivalente a negar su concepción de la ciencia.

Al examinar el papel del atomismo en la teoría de Newton sobre el color y la refracción y los colores de películas delgadas, veremos cómo su actitud sobre el uso apropiado de las hipótesis en la ciencia jugó un papel fundamental en el desarrollo y formulación de esas teorías. Al investigar los colores de películas

delgadas, introdujo otra hipótesis –un éter vibrante– para explicar la periodicidad de la luz. La hipótesis de un éter vibrante padeció un destino muy distinto a la de los corpúsculos de luz, ya que la primera –como los "accesos vibratorios" desprovistos del éter– fue más tarde elevada a un principio demostrado, mientras que la segunda siempre permaneció como hipótesis. En este documento examinaremos el destino distinto de esas dos hipótesis. Aunque la metodología de Newton puede ser considerada como muy conservadora, argumentaré que su negativa a aceptar la teoría corpuscular se justificaba por el curso de su propio programa de investigación. Finalmente, tomaremos en consideración la teoría de Newton de los cuerpos de color, en que usó una teoría atómica de la materia, pero consideró esta como una hipótesis.

Teoría de la luz y el color

Dado su antecedente filosófico, no debemos esperar que el uso de la teoría corpuscular de la luz por parte de Newton sea fácilmente notable en sus trabajos científicos publicados; hay que buscar en su trabajo inédito y en sus escritos especulativos. La óptica fue uno de los temas a los que se dedicó Newton en sus primeros años de descubrimiento, 1664-6. En su libro "Questiones quaedam philosophicae" (*Ciertas preguntas filosóficas*) de este periodo, Newton registró bajo el título "De los colores" sus ideas sobre temas ópticos tales como la naturaleza del color y la causa de la reflexión y refracción. En todas sus especulaciones trabajó consistentemente con una teoría corpuscular, aunque parecía intentar una variedad de ideas para las interacciones físicas entre cuerpos y corpúsculos de luz, o, como los llamó, "glóbulos".[3] Consideraba que la reflexión de los corpúsculos de luz ocurre variadamente desde el éter dentro de los poros de los cuerpos, desde partículas sueltas dentro de los poros, y desde las partículas del cuerpo. Tampoco podía decidir acreca de si el color de los rayos de luz se debía únicamente a su velocidad o a su velocidad y masa (momentum), e hizo un cálculo del cambio

de momentum de los corpúsculos de luz de distintos tamaños después de chocar con partículas de diferente tamaño.

A la mitad de estas notas Newton hizo uno de sus descubrimientos más importantes, esto es, que los rayos de color distinto se refractan en grados distintos.[4] Mientras que sus notas muestran que hizo un intento por explicar este descubrimiento en términos de los parámetros mecánicos de las partículas, pronto abandonaría tales especulaciones para llevar a cabo otra serie de experimentos y desarrollar una teoría de la naturaleza de la luz solar y el color. Newton trabajó los elementos esenciales de su teoría para 1666. La formuló con detalles substanciosos en sus *Optical Lectures* que hizo en la Universidad de Cambridge entre 1670 y 1672, pero no publicó la teoría hasta febrero de 1672, cuando su "Nueva teoría" apareció en *Philosophical Transactions*. Para comprobar qué papel tuvieron el atomismo o la teoría corpuscular de la luz –si es que tuvieron un papel– en el desarrollo y formulación de esa teoría, hablaré brevemente de sus elementos clave.

Newton estableció su teoría con una serie de experimentos con prismas que para los inicios del siglo XVIII se convertiría en un modelo de una ciencia experimental.[5] Toda su investigación óptica, que fue reunida en *Óptica*, se basaba en una serie extensa de experimentos relacionados, normalmente variantes de un pequeño número de arreglos experimentales fundamentales. Sus experimentos tienen una variedad de papeles en sus investigaciones, por ejemplo determinar la naturaleza precisa del fenómeno y sus causas, su confirmación, y eliminación de alternativas. A veces, como en *Optical Lectures*, la gran cantidad de experimentos con pequeñas variaciones para establecer varios puntos puede parecer tedioso, pero Newton no quería dejar lugar a objeción alguna.

El punto esencial de su teoría de la luz y el color es que un rayo de luz solar o de luz blanca es una mezcla de rayos que difieren en grado de refrangibilidad y color. Encontró que, al mismo ángulo de incidencia, los rayos de diferente color se refractan en grados diferentes, y que hay una correspondencia constante entre el color y el grado de refrangibilidad, esto es, los rayos

rojos siempre son los que se refractan menos, los violeta más, y los colores intermedios en grados intermedios (figura 1). Los rayos de cada color separado obedecen la ley de la refracción de Snell, pero con un índice de refracción distinto para cada uno.

Encontró que el color de un rayo es inmutable y no puede cambiarse por reflexión, refracción, transmisión ni ningún otro medio. Para desarrollar más su nueva teoría introdujo sus conceptos nuevos de colores simples y colores compuestos. Aunque esos dos tipos de color parecen idénticos al ojo humano, los colores simples o primarios consisten de rayos de un simple grado de refrangibilidad y los compuestos son una mezcla de rayos de diferente refrangibilidad. Pueden distinguirse siempre por refracción, que separa o descompone los rayos de diferente refrangibilidad que forman colores compuestos mientras que deja a los colores simples intactos.

Los colores del espectro –rojo, amarillo, verde, azul y violeta–, junto con sus gradaciones intermedias, son colores primarios. "Pero", anunció Newton, "la composición más sorprendente y maravillosa fue la de la blancura... siempre está compuesta". Esta fue la parte más revolucionaria de la teoría, ya que la luz solar se había considerado universalmente como homogénea, pura y simple, mientras que los colores se suponía eran alguna modificación de la luz solar. "Los colores no son *cualidades de la luz*", concluyó Newton, "derivados de las refracciones, o reflexiones de cuerpos naturales (como se cree generalmente), sino *propiedades originales* e *innatas*".[6] Siempre que aparecen los colores, solo son separados de la luz solar; nunca son creados. La teoría del color fue la base para toda la investigación óptica subsiguiente de Newton.

La idea fundamental detrás de la teoría de Newton, que los rayos de luz siempre conservan su identidad –color y grado de refrangibilidad– sin importar si están aislados o mezclados o si sufren cualquier tipo de proceso, en efecto parece ser la más naturalmente comprendida en términos de rayos de luz como áto mos. De hecho, los tres primeros y eminentes críticos de la teoría

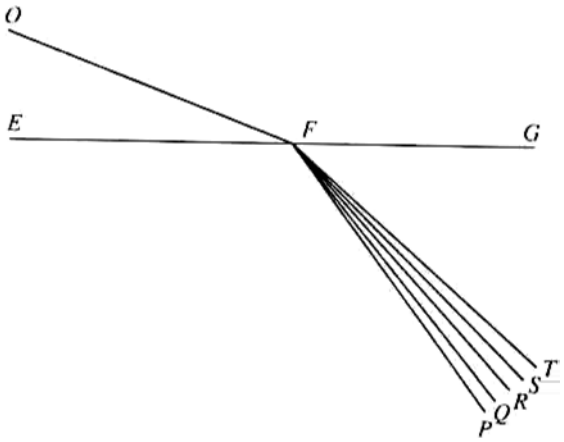


Figura 1. La refracción en la superficie *EG* descompone un rayo de luz solar *OF* en rayos de diferentes grados de refrangibilidad y color.

de Newton –Robert Hooke, Ignace Gaston Pardies y Christiaan Huygens– percibieron que Newton apoyaba una teoría atómica de la luz y estaban preocupados porque su teoría del color era incompatible con una teoría ondulatoria. Al responder a la acusación de Hooke, Newton no negó creer en la teoría de emisión, pero insistió en que no formaba parte de su teoría del color. Respondió:

> De haber sido tal hipótesis mi intención, en algún lugar la habría explicado. Pero yo sabía que las propiedades que declaré de la luz eran en alguna medida capaces de ser explicadas no una vez por esa, sino por muchas otras hipótesis mecánicas. Y por lo tanto escogí declinar a todas, y hablar de luz en términos generales, considerándola abstractamente como una cosa u otra propagada para todos lados en líneas rectas desde los cuerpos luminosos, sin determinar qué es esa cosa.[7]

Las observaciones de Newton ilustran muchas de las características de su ciencia óptica de las que hablé en la introducción: su formulación fenomenológica, que considera la luz "abstractamente" y describe propiedades evitando hipótesis, y su declaración clara de que la teoría de emisión de la luz es una hipótesis.

Para reafirmar a sus oponentes que su teoría no depende de corpúsculos de luz, luego explicó cómo la teoría ondulatoria podía acomodarse a ella. Si los teóricos de la luz consideraban que la

luz solar consistía de una mezcla de ondas de distintas longitudes ("profundidades o grandezas") que se refractan de forma diferente y provocan un color distinto, entonces sus teorías serían compatibles con su teoría del color sin la ayuda de adoptar los corpúsculos de luz. Después de ofrecer esta sugerencia pionera, explicó lo que sería su principal objeción a la teoría ondulatoria durante toda su vida, la violación a la propagación rectilínea: "es decir, las ondas o vibraciones de cualquier fluido pueden, al igual que los rayos de luz, ser propagadas en líneas rectas, sin una distribución y doblamiento continuo y extravagante por todos lados hacia el medio inmóvil en donde terminan. Me equivoco si no hay *experimento y demostración* de lo contrario".[8] Por supuesto, los rayos de luz concebidos como átomos se moverían naturalmente en línea recta cuando estuvieran en un medio uniforme.

No puede dudarse que Newton dio un uso fructífero a la teoría de emisión al desarrollar su teoría del color o que fue más fácil imaginar su teoría dentro de una teoría corpuscular en que los corpúsculos de luz conservaban su identidad, pero no hay evidencia suficiente para concluir que fue un elemento esencial en su pensar.[9]

Explicación de la reflexión, refracción y dispersión

Newton utilizó sistemáticamente la teoría de emisión de la luz en su empresa para explicar la refracción y la dispersión cromática (el grado en que los rayos de diferente color se separan por refracción, *PFT* en la figura 1). Su meta fue derivar medidas cuantitativas de estos efectos para diferentes sustancias por un método estrictamente mecánico, suponiendo que los corpúsculos de luz se desvían en la superficie de medios distintos.

La ley de reflexión había sido conocida desde la antigüedad y había sido relativamente fácil de explicar en una teoría corpuscular por un modelo simple de colisión en analogía a la reflexión de una bola en una superficie sólida. En sus primeras notas Newton utilizó las colisiones entre los corpúsculos de luz y los

cuerpos para explicar la reflexión y la refracción. Sin embargo, pronto reconoció que cuando se asume que la materia tiene una estructura atómica, este modelo colapsa. En una escala atómica la superficie de un cuerpo reflectante no es lisa como un espejo sino accidentada, con corpúsculos separados por poros. La reflexión no podría ocurrir en los corpúsculos del cuerpo porque esto requeriría el arreglo fortuito de todos los corpúsculos, sin importar el ángulo de incidencia, de manera que los rayos se reflejaran en el cuerpo a un ángulo igual a su ángulo de incidencia. Esto necesitaba que la reflexión ocurriera en el éter o, después en *Óptica*, "algún poder del cuerpo que está distribuido uniformemente en toda su superficie", es decir, una fuerza.[10] Estas soluciones eran hipotéticas, aunque la evidencia de experimentos y observación que Newton arregló en *Óptica* contra la reflexión sucediendo en los corpúsculos de los cuerpos era abrumadora.

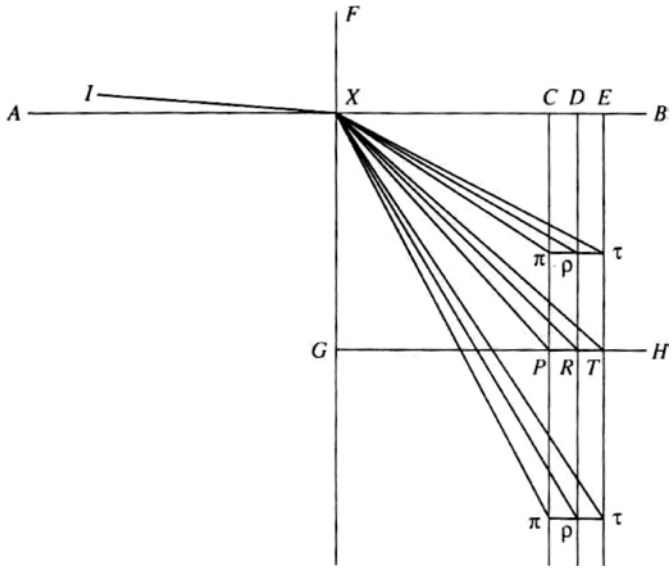


Figura 2. El modelo de dispersión de Newton, de sus *Optical Lectures*.

Newton se movió más allá de tales modelos físicos cualitativos en un ensayo, "Of Refractions", probablemente escrito entre

1666 y 1668, y calculó una tabla para el índice de refracción de los rayos extremos (rojo y violeta) en varios medios pasando hacia el aire desde el agua, vidrio y "cristal". Queda claro de una anotación en la tabla, "Las proporciones de los *movimientos* de los rayos heterogéneos de los extremos", que considera el movimiento de los corpúsculos.[11] Es posible reconstruir su tabla con esta suposición, especialmente porque utilizó el mismo modelo en sus *Optical Lectures*, aunque ahí suprimió cualquier mención a corpúsculos o movimientos.[12] Newton asume (figura 2) que cuando un rayo de luz *IX* en el aire entra al vidrio en el borde *AB* con una incidencia mínima (por ejemplo, paralela a la superficie refractora), rayos de cada color reciben el mismo incremento de velocidad perpendicular a la superficie refractora. Si *XC*, *XD*, *XE* representan el componente paralelo del movimiento de los rayos violeta, verde y rojo en el aire, que no cambia después de la refracción, entonces *XP*, *XR* y *XT* representan las refracciones de esos rayos. Cada uno ha tenido la cantidad idéntica de velocidad perpendicular a la superficie, *CP*, *DR*, *ET*, añadida a su componente paralelo de velocidad. Las refracciones en cualquier otro medio pueden ser rápidamente determinadas por este modelo una vez que la refracción principal *X*r se conoce. Este modelo asume que las proyecciones paralelas a la superficie de todos los espectros son de igual longitud y que los mismos colores siempre ocupan porciones iguales de ella, esto es, que la dispersión cromática es una propiedad de la luz y no de los medios refractores.

En sus *Optical Lectures* Newton dejó el original de esta ley de dispersión en total misterio, aunque concediendo que "todavía no he derivado la certeza de su proposición de experimentos... mientras tanto me conformo con asumirla gratuitamente".[13] Para mucho del contenido de *Optical Lectures* él siguió las implicaciones de esta ley y derivó numerosas propiedades espurias de la luz de color, todo con poco o ningún interés por la realidad. Mientras tanto, había deducido otra ley de dispersión en otros campos.[14] Newton no era capaz de decidir entre ellas por el número limitado de mediciones que hizo. De haber examinado más

sustancias, habría encontrado que ninguna de ellas es cierta.[15] Newton abandonó sus planes para publicar *Optical Lectures* por varias razones, pero es difícil creer que no reconoció que su ley de dispersión fue una hipótesis que no llevaba a ningún lado. A pesar de eso, a lo largo de su carrera continuó su empresa de encontrar una explicación matemática-mecánica de la refracción y dispersión, ya que la recompensa sería grande –una base matemática para una teoría del color– y los modelos muy manejables para la nueva ciencia. Regresaría a esto en los *Principios*.

El modelo de dispersión de Newton estaba inspirado en la derivación de la ley de refracción por Descartes (ley de Snell) en *Dióptrica* (1637). La derivación se basaba en una analogía con una bola que altera su velocidad al cruzar el límite de dos medios refractores. En una mecánica que se basaba solamente en acción de contacto, era difícil para Descartes explicar cómo la velocidad del proyectil cambiaba, especialmente cuando su velocidad aumentaba al pasar hacia un medio ópticamente más denso. En su "Hipótesis que explica las propiedades de la luz tratadas en varios de mis ensayos", que envió a la Sociedad Real en diciembre de 1675, Newton explicó cómo un éter podría servir de causa a la refracción. Asumió que el éter impregna todo el espacio y que es más raro en sustancias menos densas que tienen poros estrechos, tales como vidrio y agua, que en el espacio libre como el aire. Cuando un corpúsculo de luz se mueve por una región de éter de densidad variante, como cerca de los límites de dos cuerpos, es presionado por el éter más denso hacia el más raro, "y recibe un impulso continuo o esfuerzo desde ese lado para regresar hacia el medio más raro, y así se acelera si se mueve de esa forma, o se regresa si ocurre lo contrario". Si se asume que el cambio de movimiento ocurre perpendicular a la superficie refractante, entonces seguirá la ley de Snell.[16]

Cuando Newton había desarrollado el concepto de fuerza en *Principios*, concluyó el libro I con la sección 14 acerca de la analogía entre el movimiento de corpúsculos y la luz. Al reemplazar la acción del éter en su primer modelo de refracción por una fuerza

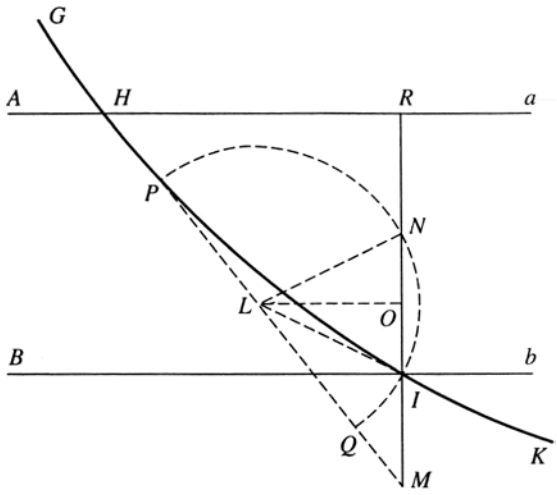


Figura 3. La derivación de Newton de la ley de refracción de Snell en *Principios*, libro I, proposición 94.

intensa de corto alcance entre los corpúsculos del cuerpo refractante y la luz, ofreció una propuesta poderosa a la óptica y, en forma más general, a la física. En la figura 3 se asume que la fuerza actúa en la región pequeña entre las superficies refractantes *Aa*, *Bb* y perpendiculares a ellas. El movimiento de las partículas en este campo se comporta exactamente como el de un proyectil "cayendo" en el campo gravitacional de la Tierra. Newton demostró que su trayectoria *HI* en la región del campo de la fuerza es una parábola ("de lo que demostró Galileo"), y que los ángulos de incidencia *QMI* y refracción *MIK* obedecen la ley de Snell.[17] La derivación produjo una expresión del índice de refracción n en términos de parámetros mecánicos. Si dejamos que $f(\rho)$ sea la fuerza por unidad de masa, donde i y r son los ángulos de incidencia y refracción, y ρ la distancia de la superficie refractante, entonces el resultado de Newton en forma analítica es:

$$n = \frac{\operatorname{sen} i}{\operatorname{sen} r} = \sqrt{1 - \frac{2\varphi}{v^2}},$$

donde v es la velocidad incidente y $\varphi = \int_0^R f(\rho)d\rho$.

Al menos para 1675 en "Hipótesis" Newton había reconocido que si el cambio de movimiento de los corpúsculos de luz ocurre perpendicular a la superficie refractante, entonces la ley de Snell siempre seguirá. Entonces, la meta de su demostración no era derivar la ley de Snell, sino demostrar que la óptica corpuscular podría introducirse al reino de la nueva mecánica y explorar sus implicaciones físicas y, en particular, explicar la causa de los distintos colores y refrangibilidad de los rayos de luz. La explicación más natural de la causa de la refrangibilidad distinta de los rayos de distinto color de acuerdo con este modelo es que la velocidad de los corpúsculos varía. Cuatro años después de la publicación de *Principios*, Newton se dio cuenta que esto podría probarse al observar el color de los eclipses de las lunas de Júpiter. Cuando un satélite desaparece detrás del planeta, el color más lento debería verse al último, y cuando volviera a emerger, el color más rápido sería visto primero. En agosto de 1691 Newton preguntó a John Flamsteed si alguna vez había observado algún cambio de color en los eclipses de las lunas de Júpiter; en febrero siguiente Flamsteed respondió que no.[18] Esto fue un serio golpe para la explicación de la refracción y dispersión por fuerzas de corto rango, ya que eliminaba la velocidad como causa del color y refracción. El modelo podría aplicarse solo con algunas suposiciones radicales que hacían conflicto con los principios de mecánica terrestre. Escoger masa en vez de velocidad sería contradictorio al movimiento de proyectiles, que es independiente de su masa. Permitir que la fuerza varíe con la naturaleza del corpúsculo y la sustancia refractante haría a la fuerza selectiva, como una reacción química, lo cual era decididamente distinto a cualquier fuerza en la nueva mecánica.[19] La elegante demostración de Newton basada en este concepto de fuerzas de corto rango tenía que restringirse a rayos monocromáticos, ya que el color no podría explicarse con su nueva mecánica.

Sin embargo, el modelo no se quedó sin algún notable éxito. En 1691 Newton lo usó para calcular la refracción de los rayos de luz que entran a la atmósfera y preparó una tabla de refrac-

ción atmosférica que era vastamente superior a cualquier cosa que existía entonces.[20] En una nota al margen a esta sección de *Principios* Newton también sugirió que las fuerzas de corto rango que actúan en los corpúsculos de luz podrían explicar la difracción. Unos cuantos años después, como veremos, intentó llevar a cabo este programa de aplicación de fuerzas de corto rango a la difracción antes de que llegara a un callejón sin salida. Newton concluyó esta nota marginal recordando a sus lectores que él proponía únicamente una analogía y no un argumento sobre la naturaleza corpuscular de la luz:

> Por causa de la analogía que existe entre la propagación de rayos de luz y el movimiento de los cuerpos, he decidido añadir las siguientes proposiciones para usos ópticos [es decir, en óptica geométrica], y mientras tanto no argumentar para nada acerca de la naturaleza de los rayos (esto es, si es que son cuerpos o no), sino únicamente determinar las trayectorias de los cuerpos, que son muy similares a las trayectorias de los rayos.[21]

Los dos teoremas que Newton añadió determinaron las superficies, óvalos cartesianos, que refractaron la luz de un punto a otro punto. Newton de hecho había resuelto el problema hacía más de quince años en sus *Optical Lectures* sin la teoría corpuscular de la luz.[22]

Newton intentó dar una explicación mecánica de las acciones de los corpúsculos de luz a lo largo de su carrera, porque prometía unificar la óptica como parte de la ciencia matemática de la mecánica y ofrecía suficientes resultados prometedores para continuar en su búsqueda. Sin embargo, no se limitó a sí mismo a los modelos mecánicos en sus especulaciones sobre la naturaleza de la luz y siempre dejó abiertas sus opiniones. Por ejemplo, cuando estaba escribiendo *Óptica* a principios de los 1690s, brevemente jugueteó con la idea que la fuerza entre los corpúsculos de luz y los cuerpos podría ser selectiva como una fuerza química: "Si los rayos de luz son cuerpos entonces se refractan por la atracción [de] las partes de los cuerpos refractantes por algún principio como las partes de ácidos y alcaloides se aceleran unos hacia los otros y se mezclan".[23] Todas estas opciones permanecieron

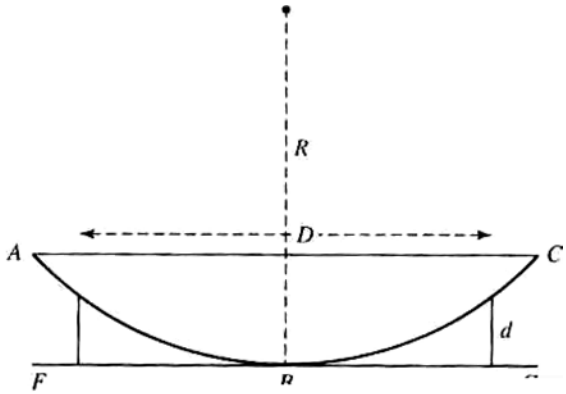
como hipotéticas, ya que ninguna de ellas tenía más que apoyo experimental ocasional.

Vibraciones etéreas y los colores de películas delgadas

En su investigación de los colores de películas delgadas, que comenzó mientras aun desarrollaba su teoría del color, Newton expandió imaginativamente su hipótesis corpuscular para incorporar el éter y sus interacciones con corpúsculos de luz para explicar la periodicidad de la luz. La característica esencial de su éter son sus vibraciones, que reflejan corpúsculos de luz en las condensaciones y las transmiten en las rarefacciones. Fue capaz de desarrollar este modelo cualitativo, mecánico, hasta un modelo matemático relativamente sofisticado que concordaba con sus observaciones a un alto grado de precisión. Justo como con el modelo corpuscular en su teoría del color, Newton suprimió las vibraciones en las explicaciones formales de su investigación de los colores de películas delgadas. Fue solo en su "Hipótesis" especulativa en 1675 que escogió explicar este modelo por completo. Aun así sus vibraciones etéreas diferían en dos maneras significativas de los corpúsculos de luz que utilizó en su teoría del color y refracción: (I) las vibraciones eran esenciales para el desarrollo de su explicación de los colores de películas delgadas, y no solo una heurística; y (II) más tarde elevaría las vibraciones –llamadas "accesos" en *Óptica*– de una hipótesis a un resultado científico confirmado, es decir, la periodicidad de la luz, mientras que los corpúsculos de luz permanecieron como hipótesis por siempre.

Newton aprendió acerca de los colores de películas delgadas de la explicación de Hooke en *Micrographia* (1665) sobre los colores vistos en hojas de mica. Hooke había conjeturado que la apariencia de los colores era periódica, aunque fue incapaz de medir el grosor de dichas películas para demostrar esto. El descubrimiento clave de Newton fue su gran idea de que al poner

una lente (que en realidad es solamente el segmento de un círculo) en un plano, entonces por un principio de geometría euclidiana sobre las tangentes a círculos podría fácilmente determinar la distancia entre ellos simplemente al medir el diámetro del círculo. Si (figura 4) una lente convexa *ABC* se coloca en una placa de vidrio *FBG* y es iluminada y vista desde arriba, un juego de círculos de color concéntricos –ahora conocidos como "anillos de Newton"– producidos por la delgada película de aire *ABCGBF* se verá a través de la superficie superior del lente. Los círculos formarán una secuencia alternante de anillos de colores brillantes y opacos, y su centro común, el punto de contacto *B*, será rodeado por un punto negro. Si el diámetro de cualquiera de esos círculos de color se indica por *D*, el grosor de la película de aire que produce ese circulo en *d*, y el radio del lente por *R*, entonces $d = D^2/8R$ según *Elementos* de Euclides, libro III, proposición 36.



Figua 4. El método de Newton para determinar el grosor *d* de una capa delgada de aire formada entre una lente esférica y un plano.

Aparentemente Newton tuvo esta idea mientras leía *Micrographia* e hizo una prueba apresurada en 1666 y la incluyó en su ensayo "De los colores". Para establecer que los círculos aparecen en múltiplos integrales de algún grosor definido, simplemente tuvo que medir el diámetro de círculos sucesivos y ver si sus cuadrados se incrementaban como los números íntegros.

Para los primeros seis círculos encontró que el grosor del aire entre el lente y el plano se incrementaba en múltiplos integrales del grosor en el primer anillo, esto es, 1, 2, 3, 4, 5, 6. Entonces calculó que "el grosor del aire para un círculo era $^{1}/_{64000}$ de pulgada, o 0,000015625 [que es el espacio de un pulso del medio vibratorio.]".[24] Sus resultados, aunque cuantitativamente amplios, como después notaría, fueron suficientes para demostrar a su satisfacción que la apariencia de los colores era un fenómeno periódico, y tuvo éxito en determinar una medida de la periodicidad. Su método para determinar el grosor de la película era en principio válido, y después le permitiría desarrollar una teoría matemática de la apariencia de colores periódicos. Además, de su afirmación entre corchetes podemos ver que desde el comienzo de su investigación ya utilizaba las vibraciones en el éter como la causa física de los anillos.

Ya que una de las metas inmediatas de Newton era mostrar que los colores de las películas delgadas eran compatibles con su reciente descubrimiento de la naturaleza compuesta de la luz del sol, él había asumido naturalmente que esos colores en la luz solar incidente que no se reflejaran por la película fueran transmitidos. Al examinar los anillos transmitidos pudo confirmar que los anillos transmitidos y reflejados eran complementarios. Y al examinar los anillos producidos por rayos de un solo color le fue posible comprender su formación en luz blanca cuando los colores no son visibles separadamente por causa de su mezcla. Es decir, fue capaz de ver que en el mismo lugar algunos rayos se reflejan mientras que otros se transmiten, y que rayos del mismo color en algunos lugares son reflejados y en otros transmitidos. En esta etapa Newton no había elaborado completamente estos puntos, especialmente el segundo, que requiere de asignar un grosor particular o longitud de vibración a cada color.

Satisfecho con este resultado fundamental y convencido de que su método funcionaba, Newton lo dejó de lado hasta que había terminado con su teoría del color. Aproximadamente en 1671 inició una investigación seria de los colores de películas

delgadas, y la bitácora de su investigación, "Of y^{e} coloured circles twixt two contiguous glasses" ("De los círculos de colores entre dos vidrios contiguos"), sobrevive.[25] La meta primaria de Newton fue examinar y describir los anillos de Newton cuantitativamente por medio de una serie de proposiciones matemáticas y medidas y observaciones de apoyo, pero aparentemente también esperaba confirmar su creencia en la constitución corpuscular de la luz y sus interacciones con el éter. En el año siguiente escribió sus resultados para enviarlos a la Sociedad Real, pero no lo envió por las controversias con su teoría del color. Cuando Newton se sintió de nuevo suficientemente cómodo con revelar sus trabajos al público, en 1675, revisó las "Observations"[26] de 1672 y las envió a la Sociedad Real con un nuevo agregado, "Hipótesis que explica las propiedades de la luz tratadas en varios de mis ensayos". La versión de 1675 de "Observations" que también contiene su teoría de cuerpos de color, fue después revisada de forma mínima para convertirse en la parte más amplia del libro II de *Óptica*. En la progresión de la investigación preliminar de "De los colores" hasta "Observations", la variedad de experimentos realizados se expandió significativamente.

Antes de entrar al modelo de corpúsculos y vibraciones etéreas de Newton, trazaré su descripción de las condiciones para la apariencia de los anillos y su periodicidad. Aunque Newton no escribió sus resultados como una ecuación, son equivalentes a la siguiente

$$d = \frac{D^2}{8R} = \frac{mI}{2},$$

donde los primeros dos términos de la ecuación expresan el teorema euclidiano citado anteriormente para el grosor de la película de aire, e I es un intervalo tal que para m impar el anillo es brillante y para m par es opaco. El intervalo I es la longitud de una vibración etérea, y después, en *Óptica*, el de un "acceso".[27] Sin embargo, en ninguna de las dos versiones de "Observations" ni en las dos partes de *Óptica* introduce Newton esta interpretación

física, aunque es aparente por "De los colores" y "Of y^{e} coloured circles" que llegó a esos resultados al trabajar con las vibraciones. Trata el intervalo meramente como una propiedad de la película determinada experimentalmente –"el intervalo de los vidrios, o grosor del aire interyacente, por el que cada color se produce"– y no de la luz.[28] Aunque Newton no calculó el valor del intervalo *I* en "Of y^{e} colored circles", en "Observations" adoptó $^{1}/_{80,000}$ de una pulgada –"para usar un número redondo"– para la media de la luz blanca (por ejemplo, para un amarillo).[29]

Solo otro valor de su investigación nos concierne, su determinación de la variación de los diámetros de los anillos cuando se coloca agua entre los lentes. De sus mediciones encontró que los diámetros de los círculos, y por lo tanto el grosor de la película, disminuyen en proporción al índice de refracción. Así la ecuación anterior se convierte en

$$d = \frac{D^2}{8R} = \frac{mI}{2n},$$

donde *n* es el índice de refracción de la película. Newton probablemente llegó a aceptar esto como una regla general válida para cualquier medio, porque fue capaz de deducirla de su modelo de partículas de luz y vibraciones etéreas. En "Of y^{e} colored circles" había expresado esta ley en la proposición 4 en términos tanto del índice de refracción (la "sutileza" del medio) y "los movimientos de los rayos en ese medio".[30] Como todas las demás proposiciones en "Of y^{e} colored circles", no se presentó ninguna derivación, pero se infiere fácilmente. Si las partículas se mueven más rápido en agua en proporción con el aumento en el índice de refracción (como requería la teoría de emisión), entonces llegarían más rápido a la superficie inferior de la película y encontrarían la primer condensación etérea. La longitud de vibración sería más corta en la proporción inversa.

Desde su primer esfuerzo por explicar los colores de películas delgadas en "De los colores", Newton intentó derivar sus

propiedades de la teoría corpuscular. Desarrolló una ley para el incremento del diámetro de los círculos de color al ser observados más oblicuamente a la superficie como una proporción expresada en términos del movimiento (momentum) y velocidad de los corpúsculos de luz incidentes. Este pasaje todavía no se comprende totalmente, pero la proporción ciertamente no concuerda con el fenómeno y Newton la borró con una gran X.[31]

Newton después haría un intento más en "Of y^{e} colored circles" ("De los círculos de color") por describir la variación de los círculos en términos del movimiento de los corpúsculos de luz. El documento abre con seis proposiciones que serían confirmadas en las observaciones subsecuentes. Las propiedades de los círculos se describen matemáticamente, y muchas de ellas se interpretan en términos de "movimiento", "fuerza", y "percusión" de los corpúsculos o rayos, aunque no se presentan derivaciones. Las siguientes dos son típicas:

> Proposición 2. Que ellos [por ejemplo, los círculos de color] se hinchan por la oblicuidad del ojo: de manera que el diámetro del mismo círculo corresponde a las [co]secantes de la oblicuidad de los rayos en la capa de aire atravesada, o recíprocamente como los senos de su oblicuidad; esto es, recíprocamente como la parte del movimiento del rayo en la capa de aire mencionada que es perpendicular a él, o recíprocamente a la fuerza que choca la superficie refractante.
>
> Proposición 3. Y entonces los espacios que pasan los rayos a través de círculos atravesados en una posición a los espacios mencionados en otra posición corresponden a los cuadrados de las [co]secantes mencionadas o recíprocamente a los cuadrados de los senos, movimiento o percusión.[32]

Ambas proposiciones fueron subsecuentemente contradichas por las observaciones que siguen en el manuscrito. En este punto Newton sin duda reconoció que el fenómeno simplemente no era susceptible a una descripción que usara corpúsculos. En todo su trabajo cuantitativo posterior en los colores de películas delgadas trabajó únicamente con las vibraciones establecidas por los corpúsculos. Sin embargo, en su pensamiento físico el encuentro de los corpúsculos con la compresión y rarefacciones

de las vibraciones tenía un papel fundamental, como vimos en su deducción de la variación de los diámetros de los anillos con índice de refracción.

Newton envió "Hipótesis que explica las propiedades de la luz tratadas en varios de mis ensayos" a la Sociedad Real porque tenía la esperanza de que revelar las hipótesis o modelos físicos que sostenían sus teorías fenomenológicas hiciese que lo comprendieran mejor. Sin embargo, insistió, "ningún hombre puede confundir este con mis otros discursos, o medir la certeza de uno con el otro".[33] "Hipótesis", la cual Newton no permitió que fuese publicada, es su trabajo más abiertamente especulativo y –a diferencia de las treinta y un Cuestiones que vagan en el paisaje científico– revela cómo usó sus especulaciones para explorar una simple teoría científica. Muestra claramente cómo fue capaz de controlar y matematizar modelos mecánicos especulativos y llegar a leyes confirmadas experimentalmente.

Las primeras dos hipótesis aseveran que el éter existe y que es capaz de vibrar. Este éter casi no tiene resistencia, ya que resiste el movimiento de las partículas de luz solo inicialmente, en su emisión de una fuente luminosa y en los bordes de cuerpos distintos, donde cambia su densidad. Cuando se emiten partículas de luz, se aceleran por "un principio de movimiento... hasta que la resistencia del medio etéreo iguala la fuerza de ese principio". De ahí que el éter ofrece poca resistencia como un vacío. Esto es contrario a los principios de la mecánica de Galileo, y Newton lo sabía: "Dios, que dio a los animales movimiento propio más allá de nuestra comprensión, puede sin duda implantar otros principios de movimiento en cuerpos que podemos comprender igual de poco. Algunos fácilmente dirán que este es espiritual; aunque uno mecánico puede demostrarse, yo no creí mejor dejarlo pasar".[34] Aunque el problema de la resistencia del éter se desvanecería cuando Newton reemplazó la acción de contacto del éter con fuerzas, esto muestra cómo fue capaz de unir dificultades físicas para llegar a la representación matemática de un fenómeno. Newton enfatiza que considera que las partículas son

luz y no las vibraciones, "supongo yo que la luz no es este éter ni su movimiento vibratorio", lo que es simplemente un efecto de la luz.[35]

El éter tiene una superficie rígida que es responsable del poder reflectante de los cuerpos. El bombardeo constante de partículas de luz provoca vibraciones en la superficie que se propagan por todo el éter. Si un corpúsculo de luz choca con la superficie cuanto está comprimida, será reflejado porque la superficie es muy dura y densa para dejar pasar al corpúsculo; pero si sucede que un corpúsculo choca con la superficie cuando está expandida, este pasará. Este es el mecanismo físico que Newton utiliza para introducir la periodicidad a una teoría corpuscular de la luz. Que haya fracasado en cuantificar la relación entre los corpúsculos y la magnitud de las vibraciones provocadas no le dificultó utilizarle como la base para describir los colores periódicos de películas delgadas. Los corpúsculos aun tienen un papel fundamental, quizá menos prominente, en que uno tiene que observar la ubicación tanto de los corpúsculos como de las vibraciones para determinar el fenómeno observado.

La periodicidad de los anillos de Newton ahora se explica fácilmente (figura 5). En el centro *A*, donde los vidrios hacen contacto, los corpúsculos serán transmitidos porque el éter en los dos vidrios es continuo, y un punto oscuro central se verá. A cierto grosor *BC* (= *I*/2) alejado del centro el corpúsculo encontrará la parte condensada de la primer vibración repentina y será reflejado, y se verá un anillo brillante; al doble del grosor *DE*, encontrará la parte rarificada y será transmitido, y se verá un anillo opaco; al triple del grosor *FG* encontrará la parte condensada de la segunda onda y se reflejará, y así seguirá en progresión aritmética, de acuerdo con la observación. Para extender este modelo a la luz blanca, Newton solo tuvo que introducir la idea que los rayos o partículas de diferente color varían en "magnitud, fuerza o vigor" y así provocar vibraciones de diferente tamaño.[36] Se asume que las vibraciones rojas son más grandes que las violetas y así forman círculos más grandes, como se puede observar.

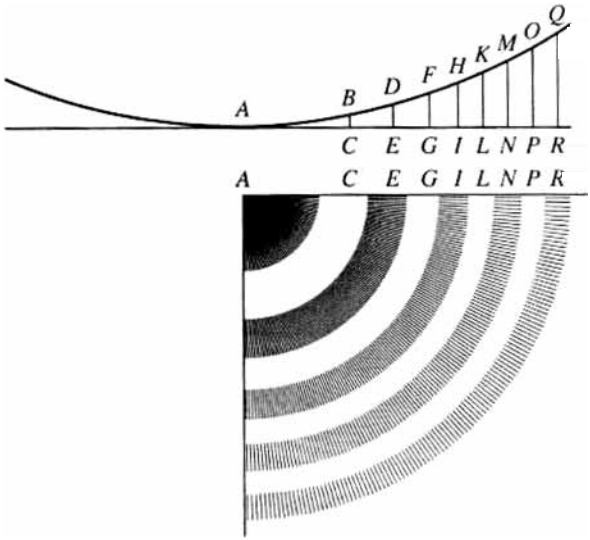


Figura 5. Un cuadrante de los anillos de Newton producidos con luz de un solo color.

En *Óptica*, Newton transformó las vibraciones etéreas en "los accesos de reflexión y refracción fácil" y las elevó a un principio establecido. Ahora se sostenía que los accesos eran una propiedad de la luz y no del éter. Meramente purgar las vibraciones de sus elementos hipotéticos fue insuficiente para que Newton los elevara a una verdad demostrada. Se necesitaba más evidencia de la periodicidad de la luz. Newton la encontró en el nuevo fenómeno de los colores de las placas delgadas, que escribió en el libro II, parte 4 de *Óptica*. Pudo explicarlas con las mismas longitudes de vibración *I* y la teoría físico-matemática para las placas delgadas, y pudo predecir el tamaño de los anillos de color de las placas gruesas con la misma precisión que las placas delgadas.[37] La existencia de los corpúsculos de luz nunca alcanzó este nivel de generalidad o confirmación.

La estructura atómica de la materia y los cuerpos de color

Si Newton siempre consideró la existencia de corpúsculos de luz como una hipótesis, supuso la existencia de corpúsculos de materia en su explicación de los colores de cuerpos naturales –los colores de todas las cosas que vemos a nuestro alrededor, como pasto, tela y nubes. Él estaba seguro de la existencia de átomos así como estaba seguro de la existencia de Dios. Aunque la teoría de cuerpos de color es una extensión de su explicación de los colores de películas delgadas y una parte integral de su teoría óptica, es igualmente una teoría acerca de la estructura y propiedades de la materia.

La esencia de la teoría de Newton es la idea de que los colores de los cuerpos se producen en la misma forma que en las películas delgadas. Desarrolló su teoría a principios de la década de 1670 simultáneamente con su explicación de los colores de películas delgadas, y forma la tercera parte de "Observations" de 1672 y 1675 y del libro II de *Óptica*. En los más de treinta años entre el tiempo en que fue desarrollada vez y publicada en *Óptica*, él abandonó el éter y desarrollo los conceptos de fuerza y accesos, pero la teoría de los cuerpos de color cambió poco.

Newton abre su teoría argumentando que los cuerpos de color transparentes y opacos consisten en corpúsculos y poros transparentes. La existencia de éter en los poros es hipotética, pero no pone en duda la existencia de corpúsculos. Su razonamiento es directo: ya que la reflexión ocurre únicamente donde existe una diferencia en la densidad óptica, para que ocurra la reflexión desde los corpúsculos que componen los cuerpos, estos deben tener poros que tienen una densidad óptica distinta de los corpúsculos. La opacidad se atribuye a reflexiones múltiples provocadas por las partes internas del cuerpo. La evidencia de Newton para estas afirmaciones proviene casi en su totalidad de cuerpos macroscópicos, y entonces se extiende a los corpúsculos imperceptibles. Por ejemplo, argumenta que las "partes mínimas" de los cuerpos

son transparentes de observaciones que muestran que, cuando se adelgazan lo suficiente, los cuerpos se hacen transparentes, y argumenta que la opacidad emerge de una multitud de reflexiones internas al observar que sustancias transparentes como el vidrio se hacen opacas cuando se quiebran y quedan piezas pequeñas. Este puede ser un modo truculento de argumentar.[38]

La proposición central en la teoría de Newton establece que: "las partes transparentes de los cuerpos, de acuerdo con sus varios tamaños, debe reflejar rayos de un color, y transmitir los de otro, en las mismas bases que las placas delgadas o burbujas reflejan o transmiten esos rayos: y esto lo tomo como la base de todos sus colores".[39] Newton demuestra esto por lo que se convertiría en su segunda regla de razonamiento en *Principios*, es decir, que "las causas asignadas a los efectos naturales del mismo tipo son, en la medida de lo posible, las mismas".[40] Él presenta evidencia que muestra que los colores de cuerpos naturales y placas delgadas son del mismo tipo, y por lo tanto tienen la misma causa. Demostrado esto, Newton estimó el tamaño de los corpúsculos que componen varios cuerpos de su color. Asumió que los corpúsculos son de la misma densidad óptica que el agua o el vidrio, "como por muchas circunstancias es obvio razonar". En su explicación de los colores de películas delgadas, Newton había preparado una tabla de los grosores de películas de aire, agua y vidrio que producen los distintos colores de cada anillo u orden. Por ejemplo, dedujo que el verde de la vegetación corresponde al verde en el tercer anillo de color, y de su tabla encontró que los corpúsculos de materia vegetal son $17^{1}/_{2} \times 10^{-6}$ o aproximadamente $^{1}/_{160,000}$ de pulgada de diámetro, suponiendo que tuvieran la misma densidad del vidrio.[41] Los corpúsculos de los cuerpos negros y de los cuerpos transparentes incoloros deben ser menos que cualquiera de esos colores que se producen, así como el punto central en los anillos de Newton no tiene color y no refleja luz.

Mientras que no es posible ver los corpúsculos de luz, Newton realmente anticipó ver los corpúsculos de los cuerpos. Explicó que él deducía los tamaños de los corpúsculos "porque no es

imposible, sino que los microscopios podrán después mejorarse hasta el descubrimiento de los corpúsculos de los cuerpos de que dependen los colores". Si su magnificación se incrementara quinientas o seiscientas veces, podríamos ver los corpúsculos más grandes, y si se hiciera "tres mil o cuatro mil veces, quizá podrían descubrirse excepto los que producen el negro".[42]

Un análisis más cercano de los corpúsculos responsables del color de los cuerpos revela algunos detalles característicos de la teoría de la materia de Newton. A pesar de su aparente tamaño pequeño, los corpúsculos son cuerpos macroscópicos y compuestos. Si consideramos una hoja delgada de vidrio incoloro que tiene este color verde, o incluso una tan delgada (aproximadamente $^{1}/_{160,000}$ de pulgada) que exhibe un amarillo del primer orden, deberá contener dentro de ese grosor un número de los corpúsculos que lo hacen vidrio. Un segmento del vidrio que sea tan ancho como es de grueso sería un pedazo de vidrio pequeño, muy pequeño, aunque con todas las propiedades del vidrio. El vidrio verde (o el pasto) será compuesto de corpúsculos del mismo tamaño de esos fragmentos, cada uno compuesto de los corpúsculos que componen el vidrio incoloro. Así, los cuerpos que componen los corpúsculos ya tienen una estructura y en sí están compuestos de partes; estos no son átomos.

"Y de ahí podemos comprender", escribió Newton en *Óptica*, "que los cuerpos son mucho más raros y porosos de lo que comúnmente se cree".[43] Si recordamos su explicación de los colores de películas delgadas y el modelo expuesto en la "Hipótesis", una película o placa delgada consiste primariamente de éter con algunas partes sólidas intermedias. La única función que asigna a las partes, además de definir los poros, es detener y absorber cualquier partícula de luz que choca con ellos. Las vibraciones del éter provocan que los rayos del mismo color se reflejen mientras que permiten que otros se transmitan. Ya que los cuerpos de color se componen de corpúsculos, cuyo grosor es el mismo que el de una película delgada de ese color, entonces esos corpúsculos deben igualmente consistir primordialmente de éter y algunas

partes. Consecuentemente, para Newton la materia realmente consiste en su mayoría de éter o de espacio vacío.[44]

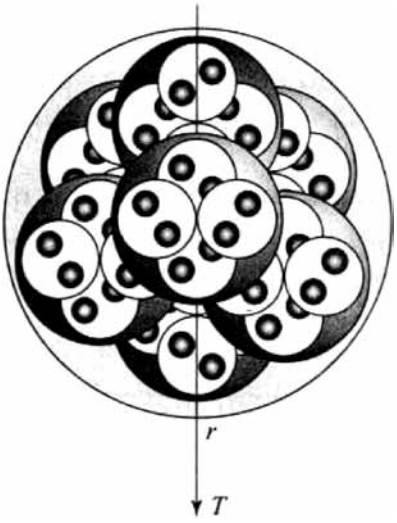


Figura 6. Un corpúsculo compuesto de materia que ilustra el concepto jerárquico newtoniano de la estructura de la materia. Un rayo de luz *T* se transmite a través de un corpúsculo si no choca con una de sus partes.

delgada consiste primariamente de éter con algunas partes sólidas intermedias. La única función que asigna a las partes, además de definir los poros, es detener y absorber cualquier partícula de luz que choca con ellos. Las vibraciones del éter provocan que los rayos del mismo color se reflejen mientras que permiten que otros se transmitan. Ya que los cuerpos de color se componen de corpúsculos, cuyo grosor es el mismo que el de una película delgada de ese color, entonces esos corpúsculos deben igualmente consistir primordialmente de éter y algunas partes. Consecuentemente, para Newton la materia realmente consiste en su mayoría de éter o de espacio vacío.[44]

Para explicar cómo la materia aparentemente sólida podría consistir en su mayoría de poros, Newton finalmente reveló sus ideas sobre la estructura jerárquica de la materia en la traducción latina de *Óptica*, aunque había tenido esta idea desde casi el principio de su carrera científica. Probablemente se encontró por primera vez con ella al leer a Boyle, y no era una visión infrecuente en los trabajos de alquimia del siglo xvii. Si imaginamos

que un cuerpo consiste de partes y poros y que los poros ocupan tanto espacio como las partes, y si después imaginamos que cada una de esas partes se compone de forma similar de poros y partes más pequeños que ocupan un espacio igual, y después imaginamos que este proceso continúa hasta que se llega a partículas sólidas o átomos, entonces los cuerpos consistirían en su mayoría de poros (figura 6). Un cuerpo, por ejemplo, con cuatro composiciones de ese tipo tendría quince veces más poros que partes sólidas, y con diez composiciones encima de mil veces más poros que partes sólidas. Es importante reconocer que Newton ofreció esta estructura particular solo como posibilidad, porque "hay otras formas de concebir cómo los cuerpos pueden ser porosos en exceso. Pero lo que es realmente su formación interna todavía no lo conocemos".[45]

Que Newton no considerara la existencia de átomos como una hipótesis se vuelve aparente por un prefacio que escribió para *Óptica* en 1703 pero que no publicó. Consideró la posibilidad de deducir todos los fenómenos solo por cuatro "suposiciones generales" o "principios". Estos principios no eran hipótesis, sino que se derivaban de inducción, ya que "no hay otra manera de hacer nada con certeza más que sacando conclusiones de experimentos y fenómenos hasta que llegas a principios generales". Los primeros tres principios son la existencia de Dios, la impenetrabilidad de la materia y la ley de atracción gravitacional. Al describir el cuarto principio, anunció que su intención era derivar la teoría de los colores de cuerpos naturales de su teoría corpuscular, jerárquica, de la materia:

> Un cuarto principio es que todos los cuerpos sensibles son agregados de partículas juntas con muchos intersticios o poros entre ellas... por el tercer principio dimos una explicación antes de los movimientos de los planetas y del flujo y reflujo del mar, así por este principio daremos en el siguiente tratado una explicación de los colores permanentes de los cuerpos naturales, siendo requisito para la producción de esos colores nada más que los cuerpos abunden con partículas traslúcidas de cierto tamaño y densidad. Esto se debe comprender de las partículas más grandes con poros más grandes entre ellas si se puede concebir que esas partículas

> más grandes se componen de partículas más pequeñas con poros más pequeños entre ellas.[46]

La teoría corpuscular de la materia no fue entonces para Newton una hipótesis sino un principio establecido con tanta certeza como la existencia de Dios o la teoría de la gravitación. Él cita dos tipos principales de evidencia en su apoyo: varias sustancias penetran los poros de los cuerpos, como el agua en materia vegetal y animal, y el mercurio en los metales; y la transparencia, que demuestra que la luz pasa a través de los poros de una gran variedad de cuerpos (lo que, seguramente, asume una teoría de emisión de la luz). La teoría de los cuerpos de color no solo se funda en la cualidad corpuscular de la materia, era una teoría de la materia que atribuía propiedades específicas y arreglos a los corpúsculos que provocan la transparencia u opacidad y colores de los cuerpos. Para Newton haber considerado la cualidad corpuscular como una hipótesis o una asunción hubiese sido violar uno de sus principios metodológicos más fundamentales.

Atomismo e hipótesis

Cuando Newton completaba *Óptica* a principios de la década de 1690, llevó a cabo una investigación sobre la difracción y la escribió como el último libro de *Óptica*. Adoptó su estrategia fenomenológica usual y describió sus observaciones y experimentos mientras deliberadamente evitaba hipótesis físicas. Sus documentos inéditos muestran que en sus otras investigaciones usó por completo la teoría corpuscular de la luz y –y esto se hizo después de *Principios*– fuerzas de corto rango. Asumió que la difracción ocurría cuando los corpúsculos de luz pasan muy cerca del límite de un cuerpo y se desvían por las fuerzas de corto rango de los corpúsculos del cuerpo. Pudo desarrollar este modelo matemáticamente y realizó algunas mediciones y cálculos con él. Incluso derivó algunas leyes que rigen la difracción. Después de completar el manuscrito, sin embargo, realizó un experimento que demostraba de forma conclusiva que este modelo con fuerzas y

corpúsculos no podía ser correcto. Newton retiró este libro del manuscrito de *Óptica* con la intención de llevar a cabo más experimentos y de revisarlo. Resultó que se encontraba cerca del final de su carrera científica y que nunca hizo más experimentos ópticos. Poco antes de publicar *Óptica* en 1704, simplemente revisó el libro y eliminó los resultados que dependían del modelo de fuerza-corpúsculo.[47]

Si Newton había esperado que su investigación sobre la difracción vindicara finalmente la naturaleza corpuscular de la luz, este episodio lo habría dejado sin esperanzas. La teoría corpuscular de la luz permanecería como hipótesis. Esta no era de ninguna manera la primera vez que sus esfuerzos por establecer esa teoría fueron obstruidos. Sus modelos de dispersión no pudieron ser confirmados experimentalmente; su intento por deducir las propiedades de los colores de películas delgadas por el movimiento de los corpúsculos de luz falló; la derivación de la refracción en *Principios* era elegante, pero encontró serios problemas cuando las pruebas con un eclipse no confirmaron la interpretación de velocidad. Newton tuvo varios éxitos, especialmente con sus modelos cualitativos, tales como su interpretación de su teoría del color, y la causa de los anillos de Newton, y el cálculo de la refracción atmosférica. Este no es un récord excelso, y podemos comprender la convicción de Newton de que la teoría corpuscular de la luz era una hipótesis. Ciertamente fue fructífera, guiándolo por una serie de investigaciones importantes al sugerir experimentos y leyes nuevas, pero no había sido confirmada en ninguna generalidad, como lo había sido la periodicidad de la luz. Newton no actuaba con demasiada exigencia a su propia metodología al distinguir certezas de conjeturas, sino más bien ejercitaba un juicio científico objetivo.

Ya que juzgaba a la teoría corpuscular de la luz como una hipótesis, la mayoría de los documentos de Newton publicados sobre el tema se encuentran en las Cuestiones de *Óptica*. Aquí Newton discute temas tales como la teoría corpuscular y el origen de los colores, accesos, difracción y refracción doble, y

también dedica sustancial atención a refutar las teorías rivales como la ondulatoria y continua, sin mencionar la sensación, el calor, y especialmente la química. En una revisión anónima en 1715 Newton claramente describió la naturaleza hipotética de las Cuestiones y explicó por qué las apartó del resto de *Óptica*. En *Principios* y *Óptica* escribió: "el señor Newton" adoptó la "filosofía experimental", en que "las hipótesis no tienen lugar, a menos que sean conjeturas o preguntas propuestas para ser examinadas por experimentos. Por esta razón el señor Newton en su *Óptica* distinguió esas cosas que resultaron ciertas por medio de experimentos de aquellas que permanecieron inciertas, y las propuso al final de su *Óptica* en forma de Cuestiones".[48] En el siglo XVIII las Cuestiones fueron ampliamente interpretadas como representantes de las ideas declaradas de Newton sobre los temas discutidos más que como especulaciones. Nuestro estudio del uso de Newton de las hipótesis corpusculares en sus investigaciones ópticas, esto es, su práctica científica real, demuestra cuán equivocada era esta idea.[49]

NOTAS

[1] Alan E. Shapiro (ed.), *The Optical Papers of Isaac Newton*, *Volume I: The Optical Lectures, 1670–1672* (Cambridge: Cambridge University Press, 1984), p. 89.

[2] Newton, "New Theory about Light and Color", en *The Correspondence of Isaac Newton*, ed. H. W. Turnbull, vol. I (Cambridge: Cambridge University Press, 1959), p. 100.

[3] John E. McGuire y Martin Tamny (eds.), *Certain Philosophical Questions: Newton's Trinity Notebook* (Cambridge: Cambridge University Press, 1983), p. 432.

[4] Newton no pensó que los rayos de luz tienen color; más bien sostuvo que tienen un poder o disposición para provocar la percepción de un color: vea la definición siguiendo al libro I, parte 2, proposición 2, en *Opticks: or, A Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light. Based on the Fourth Edition London, 1730* (New York: Dover Publications, 1952), pp. 124-5. Sin embargo, para evitar palabrerías excesivas y molestas, es más fácil decir rayos rojos, rayos azules, etcétera.

[5] Para saber del desarrollo histórico de la teoría del color de Newton ver Richard S. Westfall, "The Development of Newton's Theory of Color", *Isis* 53 (1962), 339-58; y A. Rupert Hall, *All Was Light: An Introduction to Newton's Opticks* (Oxford: Clarendon Press, 1993).

[6] Newton, "New Theory", *Correspondence*, pp. 97, 98.

[7] Newton a Oldenburg para Hooke, 11 de junio de 1672, *Correspondence*, p. 174.

[8] Ibíd., p. 175. Newton desarrolló esta objeción en *Principios*, libro II, proposiciones 41-2, y en *Óptica* [*Opticks*], Cuestión 28.

[9] Ver John Hendry, "Newton's Theory of Colour", *Centaurus* 23 (1980), 230-51.

[10] *Óptica*, libro II, parte 3, proposición 8, p. 266.

[11] Ver Newton, *Correspondence*, p. 103, n. 6; cursivas añadidas; y D. T. Whiteside (ed.), *The Mathematical Papers of Isaac Newton*, 6 vols. (Cambridge: Cambridge University Press, 1967-81), vol. I, pp. 559-74.

[12] Newton, *Optical Lectures*, pp. 199-203; ver también Zev Bechler, "Newton's Search for a Mechanistic Model of Colour Dispersion: A Suggested Interpretation", *Archive for History of Exact Sciences* II (1973), 1-37, esp. pp. 3-6.

[13] Newton, *Optical Papers*, p. 201.

[14] Lo que he llamado su ley de dispersión linear, que se basa en la división musical del espectro; Shapiro, "Newton's 'Achromatic' Dispersion Law: Theoretical Background and Experimental Evidence", *Archive for History of Exact Sciences* 21 (1979), 91-128. Newton adoptó esta ley en *Óptica*, libro I, parte 2, proposición 3, experimento 7.

[15] En el siglo XVIII se descubrió que no hay ley alguna que relacione dispersión con refracción, y que la dispersión es una propiedad de la materia y no de la luz, como Newton había asumido.

[16] Newton, *Correspondence*, p. 371.

[17] Newton, *The Principia, Mathematical Principles of Natural Philosophy: A New Translation*, trad. I. Bernard Cohen y Anne Whitman (Berkeley: University of California Press, 1999), libro I, parte I, proposición 94, p. 622.

[18] Este episodio se relata en Alan E. Shapiro, *Fits, Passions, and Paroxysms; Physics, Method, and Chemistry and Newton's Theories of Colored Bodies and Fits of Easy Reflection* (Cambridge: Cambridge University Press, 1993), pp. 144-7. Ver también Bechler, "Newton's Search", p. 22; y Jean Eisenstaedt, "L'optique balistique newtonienne à l'épreuve des satellites de Jupiter", *Archive for History of Exact Sciences* 50 (1996), 117-56.

[19] De hecho, Newton consideró la posibilidad de que la fuerza óptica se comportara como una fuerza química; ver nota 23.

[20] Ver D. T. Whiteside (ed.), *Mathematical Papers of Isaac Newton*, vol. 6 (1974), pp. 422-5, 431-4; D. T. Whiteside, "Kepler, Newton and Flamsteed on Refracion through a 'regular aire': The Mathematical and the Practical", *Centaurus* 24 (1980), 288-315; y Bechler, "Newton's Search", pp. 23-6.

[21] Newton, *Principios*, libro I, parte I, proposición 96, escolio, p. 626.

[22] Newton, *Optical Papers*, pp. 417-19.

[23] Shapiro, *Fits, Passions and Paroxysms*, p. 142, n. 16.

[24] McGuire y Tamny (eds.), *Certain Philosophical Questions*, pp. 476-8. Los corchetes son la forma que Newton usaba para expresar sus comentarios especulativos o interpretativos. Para una explicación detallada de las investigaciones de Newton sobre los colores y la teoría de las vibraciones ver Shaphiro, *Fits, Passions, and Paroxysms*, capítulos 2 y 4; y para una discusión filosófica, que históricamente es algo obsoleta, Norwood Russell Hanson, "Waves, Particles, and Newton's 'Fits'", *Journal of the History of Ideas* 21 (1960), 370-91.

[25] Richard S. Westfall, "Isaac Newton's Coloured Circles twixt Two Contiguous Glasses", *Archive for History of Exact Sciences* 2 (1965), 183-96.

[26] Ya que Newton dejó sin título lo que yo llamo "Observations", ha recibido varios nombres. En I. Bernard Cohen (ed.), *Isaac Newton's Papers and Letters on Natural Philosophy and Related Documents* (Cambridge, MA: Harvard University Press, 1958) fue llamado "Newton's Second Paper on Color and Light", y en *Correspondence* "Discourse of Observations".

[27] El grosor del aire al que se produce el primer anillo brillante es la mitad de la vibración física, o longitud de pulso, que yo llamo el intervalo *I*. Todos los otros anillos, brillantes y opacos, aparecen en múltiplos integrales de este grosor. La ley de Newton para la apariencia de anillos es la misma que la derivada de acuerdo a la teoría ondulatoria moderna excepto por

un factor de 2, porque su intervalo *I* resulta ser un medio de la longitud de onda l en la teoría ondulatoria de la luz.

[28] Observación 5, en Thomas Birch (ed.), *The History of the Royal Society of London, for Improving of Natural Knowledge, From Its First Rise*, 4 vols. (London, 1756-7; reimpresión en Brussels: Culture et Civilisation, 1968), vol. 3, p. 274; que se incluye en Cohen, *Newton's Papers and Letters*.

[29] Observación 6, Birch, *History*, vol. 3, p. 275. En *Óptica*, Newton redeterminó este valor y encontró que era un sorprendente 11% menor o 1/8,9000, que es muy cercano al valor moderno; ver Shapiro, *Fits, Passions, and Paroxysms*, pp. 167-9.

[30] Westfall, "Newton's Coloured Circles", p. 191.

[31] Ibíd., pp. 187-9.

[32] Ibíd., p. 191.

[33] Newton, *Correspondence*, p. 364.

[34] Ibíd., p. 370.

[35] Ibíd., p. 370.

[36] Ibíd., p. 376.

[37] Ver Shapiro, *Fits, Passions, and Paroxysms*, capítulo 4.

[38] Para ver una discusión de la teoría de los cuerpos de color de Newton y su modo de demostración, ver ibíd., capítulo 3.

[39] Birch, *History*, vol. 3, p. 299.

[40] Ibíd., p. 303.

[41] Birch, *History*, vol. 3, p. 301.

[42] Ibíd., p. 303.

[43] Newton, *Óptica*, libro II, parte 3, proposición 8, p. 267. Este pasaje no estaba en "Observations".

[44] En *Óptica* el éter se reemplaza por el espacio vacío y las vibraciones por "accesos", pero la convicción de Newton de que los cuerpos contienen poca materia ponderable no cambió. Sobre la teoría de la materia y el atomismo de Newton, ver McGuire, "Body and Void and Newton's *De mundi systemate*: Some New Sources", *Archive for History of Exact Sciences* 3 (1966), 206-48.

[45] Newton, *Óptica*, libro II, parte 3, proposición 8, p. 269. Este ejemplo particular de división continua es solo un ejemplo. En sus documentos inéditos Newtion tiene cálculos con otras divisiones, tales como siete partes de materia y seis partes de poros; vea el bosquejo de Newton de un agregado a *Principios*, libro III, proposición 6, en A. Rupert Hall y Marie Boas Hall (eds.), *The Unpublished Scientific Papers of Isaac Newton: A Selection from the Portsmouth Collection in the University Library, Cambridge* (Cambridge: Cambridge University Press, 1962), pp. 314, 317.

[46] J. E. McGuire, "Newton's 'Principles of Philosophy': An Intended Preface for the 1704 *Opticks* and a Related Draft Fragment", *British Journal for the History of Science* 5 (1970), 178-86, en pp. 183, 184.

[47] Para la investigación de Newton sobre difracción, ver Alan E. Shapiro, "Newton's Experiments on Diffraction and the Delayed Publication of the *Opticks*", en Jed Z. Buchwald e I. Bernard Cohen (eds.), *Isaac Newton's Natural Philosophy* (Cambridge, MA: MIT Press, 2001).

[48] [Newton], "An Account of the Book Entitled *Commercium epistolicum*", *Philosophical Transactions* 29 (Cambridge, MA: MIT Press, 2001).

[49] Sobre la recepción de las Cuestiones en el siglo xviii ver I. Bernard Cohen, *Franklin and Newton: An Inquiry into Speculative Newtonian Experimental science and Franklin's Work in Electricity as an Example Thereof*, Memoirs of the American Philosophical Society 43 (Philadelphia: American Philosophical Society, 1956); Arnold Thackray, *Atoms and Powers: An Essay on Newtonian Matter-Theory and the Development of Chemistry* (Cambridge, MA: Harvard University Press, 1970); y Casper Hakfoort, *Optics in the Age of Euler: Conceptions of the Nature of Light, 1700-1795*, trad. Enid Perlin-West (Cambridge: Cambridge University Press, 1995).

Dos tipos de la teoría de la modificación de la luz: algunas nuevas observaciones sobre la controversia Newton-Hooke de 1672 con respecto a la naturaleza de la luz

Hideto Nakajima

"Two kinds of modification theory of light: some new observations on the Newton-Hooke controversy of 1672 concerning the nature of light", *Annals of Science*, volumen: 41, núm. 3, 1984. pp. 261-278. **© T & F UK Journal Permissions**.

1. Introducción

En el tiempo de Newton, la naturaleza de la luz y los colores fue explorada en dos tipos de la teoría de la modificación de la luz: la de Aristóteles por un lado y la de Descartes-Hooke por el otro. Los historiadores de la ciencia no han enfatizado de manera suficiente la coexistencia de estas dos teorías, y esto parece haber causado cierta confusión en la interpretación de la controversia óptica entre Newton y Hooke en 1672.[1] Algunos historiadores suponen que Hooke defendía la teoría de modificación de Aristóteles y que Newton se le oponía, mientras que otros consideran que Hooke adoptó la teoría de modificación de Descartes-Hooke y se encontró con la refutación de Newton.

La primera meta del documento presente es probar que estos dos tipos de teoría de modificación en realidad coexistían, y sobre esa base presentar una nueva interpretación de la controversia óptica de 1672. El segundo objetivo es describir las características y el papel histórico de cada una de estas teorías e inquirir en la contribución de la teoría de modificación de Aristóteles a la formación de la teoría óptica de Newton.

La parte I tratará la controversia de Newton con Hooke (1672) e indicará cómo las interpretaciones hasta ahora hechas por historiadores de la ciencia tienen partes inadecuadas. Entonces, tomando en consideración el cuaderno de estudiante de Newton, se demostrará la coexistencia de los dos tipos de teoría de modificación. También se discutirán los caracteres de las dos teorías.

La parte II describirá la formación de la teoría de la luz y los colores de Newton y la contribución de la teoría de modificación de Aristóteles que generalmente se ha supuesto incompatible con la teoría de Newton.

Parte i

2. ¿Qué era la teoría de modificación de los colores?

Newton envió su famosa disertación "Nueva teoría acerca de la luz y los colores" a la Sociedad Real en 1672, lo que causó una controversia entre él y Hooke. Entonces se afirmó generalmente que la controversia se debía a su diferente actitud hacia la teoría de modificación o calificación de los colores.[2] Newton escribió en su disertación:

> Los colores no son *calificaciones de la luz*, derivados de refracciones, o reflexiones de cuerpos naturales (como se cree generalmente), sino *propiedades originales* e *innatas* que son diferentes en rayos diferentes.[3]

Pero Hooke no podía asentir a esta proposición.[4] Él respaldaba la teoría de modificación de los colores, mientras que Newton la rechazaba.

¿Qué era esta teoría de modificación de los colores? Es sorprendente encontrar que incluso los dos famosos historiadores de la óptica newtoniana, los profesores R. S. Westfall y A. I. Sabra, sostienen interpretaciones distintas en este punto. Por tanto, comenzaré mi argumento examinando las diferentes interpretaciones de los dos historiadores de la ciencia.

2.1. La teoría de modificación como el concepto de los colores de Aristóteles: la interpretación de Westfall de la controversia Newton-Hooke

De acuerdo con Westfall, la teoría de modificación de Aristóteles era ampliamente aceptada antes del tiempo de Newton, y en conexión con esta teoría surgió la controversia entre Newton y Hooke. El concepto de los colores de Aristóteles asumía que el blanco era el color original de la luz, con los otros colores formados por la mezcla de la oscuridad (o negro) con la luz (o blanco). Esta teoría de modificación de Aristóteles fue aceptada durante

la Edad Media, como en los casos de Grosseteste, Albertus Magnus, Witelo y Teodorico de Friburgo, y después fue aceptada por Descartes.[5] Westfall escribe:

> Al formular su teoría de los colores Descartes conscientemente interpretó el papel del rebelde, proyectando la doctrina peripatética de las cualidades y los colores para sustituir una explicación mecánica. Poco comprendió el rebelde cuánto lo limitaban las ataduras de la tradición. Incluso al rechazar la doctrina peripatética, aceptó, sin cuestionar y al parecer sin percibirlo, suposiciones básicas con respecto a los colores. [...] La suposición fundamental de este concepto de los colores, enunciado desde el punto de vista de *Meteorologica* [de Aristóteles], sostiene que los colores son modificaciones de la luz pura. Una segunda suposición iguala la fuerza con la brillantez. Así el rojo es considerado la aproximación más cercana al blanco –producido cuando la luz fuerte es modificada por un medio oscuro o reflejada desde una superficie oscura. Al disminuir la fuerza de la luz y aumentar la mezcla de oscuridad, aparecen primero el verde y por último el violeta, oscuro, débil, y el último paso antes de la oscuridad... a saber, todos los colores entran en una escala entre los extremos contrarios de negro y blanco.[6]

Y Robert Hooke, un adversario de Newton,

> también estaba investigando los colores. Aunque Hooke presentó una breve y devastadora crítica de la teoría cartesiana de los colores en su *Micrographia*, estaba totalmente bajo el dominio de la visión cartesiana de la naturaleza.[7]

Así, 'le quedaba a Isaac Newton retar el concepto tradicional de la modificación'.[8] Hooke defendió esta teoría tradicional, mientras que Newton abrió 'un ataque razonado sobre la doctrina de la modificación'.[9] Westfall continúa:

> Mientras que la teoría de modificación sostenía que la luz ordinaria del sol era simple y homogénea, Newton demostró que es una mezcla heterogénea de lo que llamó rayos disformes, rayos que difieren en refrangibilidad, en reflexibilidad y en el color que exhiben.[10]

En sus libros Westfall repite la misma visión.[11]

Si la postura de Westfall fuera el caso, Hooke era un defensor de la teoría de modificación de Aristóteles, y debe haber aceptado los criterios siguientes del concepto de los colores de Aristóteles:

(a) El blanco es el color original de la luz y otros colores son producidos por la modificación de él.

(b) La modificación surge por la mezcla de oscuridad a la luz, y el color de la luz es determinado por la cantidad de oscuridad que contiene. El rojo es la aproximación más cercana al blanco. Contiene la menor oscuridad. Al aumentar la mezcla de oscuridad y declinar la fuerza de la luz, aparecen primero el verde y finalmente el violeta, etcétera.

¿Admitió Hooke lo anterior? Probablemente admitió (a), ya que escribió:

> El *blanco* no es nada más que un pulso o movimiento, propagado por un medio homogéneo, uniforme y transparente; y [...] el color no es nada más que la perturbación de esa luz.[12]

Para Hooke, el blanco era el color de la luz original sin perturbar. ¿Y qué hay de (b)? Él nunca admitió (b). No consideró que todos los colores estuvieran hechos de la mezcla de oscuridad con luz o que cayeran en una escala entre los extremos contrarios del negro y blanco.

Sin embargo, Westfall supone que Hooke también admitió (b). Él toma 'la explicación de Hooke' del espectro solar y escribe:

> De acuerdo con la explicación de Hooke, el ángulo frontal del pulso oblicuo [*BO*] es 'amortiguado' por la resistencia del medio oscuro que limita con el rayo (¡de nuevo el papel de la oscuridad en la modificación de la luz!). Mientras más se aleje el pulso de la superficie refractante [*BA*], más penetra la amortiguación en el rayo, y el perfil del rayo refractado revela una región muerta triangular –inevitablemente azul– con su ápice en la superficie refractante. Del lado opuesto del rayo, mientras tanto, el borde siguiente, con su trayectoria preparada por el ángulo líder golpeado, crece más fuerte y propaga un movimiento en el medio adyacente en reposo. De ahí que se encuentre un fuerte área roja triangular del otro lado del rayo.[13]

Debe notarse aquí que esta no es la explicación de Hooke del espectro solar, sino que es meramente la interpretación de Westfall de la explicación de Hooke, que no representa correctamente la teoría de Hooke. La base de mi crítica consiste en la discusión siguiente, presentada bajo tres subtítulos.

(1) La explicación de Hooke del espectro

Hooke explicó el fenómeno del espectro solar de su propia definición de los colores, la cual es diferente de la teoría de modificación de Aristóteles. La 'definición de los colores' de Hooke fue dada en su *Micrographia*.

> Que el azul es una impresión sobre la retina de un pulso de luz oblicuo y confuso, cuya parte más débil precede y cuya parte más fuerte le sigue. Y que el rojo es una impresión sobre la retina de un pulso de luz oblicuo y confuso, cuya parte más fuerte precede y cuya parte más débil le sigue.[14]

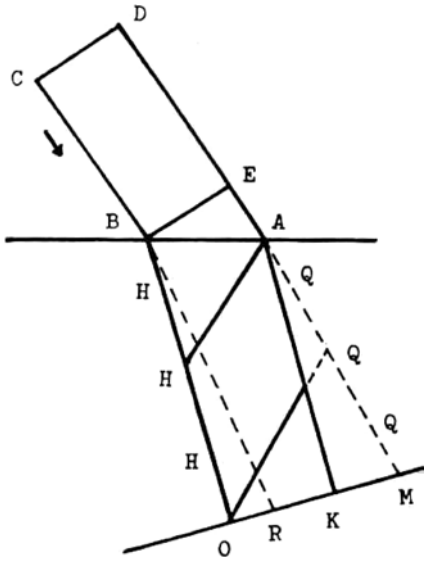


Figura 1. Explicación de Hooke del espectro del sol.
BOR es azul y AKM es rojo.

Nunca dijo que el rojo era la impresión del pulso más fuerte y el azul del pulso más débil, sino que el color de la luz era determinado por el orden de los pulsos fuertes y débiles. El rojo, por ejemplo, no era la impresión de la luz que contenía la menor oscuridad, sino que era la impresión del pulso de luz oblicuo 'cuya parte más fuerte precede y cuya parte más débil le sigue'.

La producción del espectro del sol era explicada de acuerdo con esta definición de los colores en la misma *Micrographia*. Aunque Hooke no dio una explicación completa, la podemos reconstruir con facilidad. En la figura 1 un pulso de luz *BCDE* cae oblicuamente sobre la superficie *AB*. Después de la refracción, el pulso es hecho oblicuo a lo progresivo por la diferencia de las velocidades de la luz en medios diferentes. El extremo *B* que precede el otro extremo *E* debe necesariamente, escribió Hooke, ser algo más reducido o impedido por la resistencia del medio transparente que el otro extremo *E*, y el rayo 'tiene su lado *HH* más amortiguado por la resistencia del medio oscuro o en reposo'.

> De ahí habrá un tipo de amortiguación superinducida del lado *HHH*, que continuamente aumentará desde *B* y golpeará más y más profundo dentro del rayo por la línea *BR*; de ahí todas las partes del triángulo *RBHO* será de un color *azul* amortiguado, y será más profundo por cuán cerca esté de la línea *BHH*, que está muy amortiguada o impedida...[15]

Es aparente que *BO* está más amortiguado que *BR*, y que *BO* precede a *BR* por la oblicuidad del pulso a lo progresivo. En el triángulo *BOR*, por tanto, la parte más débil del pulso *BO* precede y la parte más fuerte *BR* le sigue. Entonces *BOR* debe ser azul de acuerdo con la definición de Hooke de los colores.

> Enseguida del otro lado del rayo, el extremo *A* del pulso *AH* será promovido, o fortalecido, teniendo su pasaje ya preparado por las otras partes precedentes, y así su impresión será más fuerte, y por su *oblicuidad* al rayo, se propagará una especie de movimiento débil hacia *QQ* [...] de donde todo el triángulo *AKM* será teñido con un *rojo*.[16]

En el triángulo *AKM*, *AK* precede a *AM*, y *AK* es más fuerte que *AM*. La parte más fuerte *AK* precede y la parte más débil *AM* le sigue. Entonces *AKM* debe ser rojo.

Si Hooke hubiera aceptado la concepción aristotélica de los colores, *AK*, la parte más fuerte del pulso completo, debe haber sido roja. Pero 'el *rojo* será más profundo mientras más se aproxime a la línea *MA*'.[17] La teoría de Hooke se parecía a la teoría de modificación de Aristóteles en el punto que tomó en cuenta el medio oscuro que limita el rayo. Pero las dos teorías eran bastante

distintas. Hooke no suponía que los colores eran producidos por la mezcla de oscuridad con luz en contraste con la teoría aristotélica de modificación. Los colores eran producidos por la resolución del pulso de luz a la hilera de pulsos débiles y fuertes, que era causada por el medio oscuro.

(2) La explicación de Hooke de los colores de cuerpos delgados transparentes

Para explicar el fenómeno de los colores que aparecen en cuerpos delgados transparentes, Hooke señaló que 'en esta producción de colores no hay necesidad de una sombra terminante,'[18] mientras que tal sombra era esencial para la teoría de modificación de Aristóteles. Este fenómeno era muy importante para Hooke y el experimento con él había de ser

> uno tal como el que nuestro tres veces excelente Verulamio[19] llama *Experimentum Crucis*, sirviendo como guía o punto de referencia, por el cual dirigir nuestro curso en la búsqueda por la verdadera causa de los colores.[20]

La teoría de Hooke debía explicar este fenómeno si fuera una teoría correcta. Hooke escribió:

> Las cuales propiedades, como ya se han manifestado en el prisma y en las gotas de lluvia que caen, son la causa de los colores ahí generados, se puede fácilmente encontrar que son también los eficientes de los colores que aparecen en cuerpos delgados transparentes *laminados*...[21]

Los colores de placa delgada y los colores del espectro solar eran explicados por la misma base teórica, es decir, por el orden de los pulsos débiles y fuertes. Para la producción de colores en un cuerpo laminado, el cuerpo debe no ser demasiado grueso ni demasiado delgado y debe ser transparente. Además, debe haber un cuerpo reflectante considerable adyacente al lado inferior de la lámina.[22] Cuando un pulso de luz cae en el cuerpo laminado *AN*, una parte de él es reflejada en el lado superior y la otra parte es reflejada en el lado inferior del cuerpo (figura 2). El pulso *ef*, que es reflejado desde el lado inferior, es más débil no solo en razón de las dos refracciones en la superficie *AB*, sino en razón del

tiempo utilizado en pasar y volver a pasar entre las dos superficies *AB* y *EF* que el pulso *cd*, que es reflejado del lado superior *AB*. El pulso *ef* va detrás del pulso *cd*.

> ...este pulso confuso o *duplicado*, cuya parte más fuerte precede y cuya parte más débil sigue, produce en la *retina* la sensación de un *amarillo* [rojo].[23]

Si el cuerpo laminado es más grueso, el pulso *ef* va más detrás.

> Y en este caso parecerá más bien que precede el pulso más fuerte siguiente [*c'd'*], entonces [que] seguir el precedente [*cd*] y en consecuencia se generará un *azul*.[24]

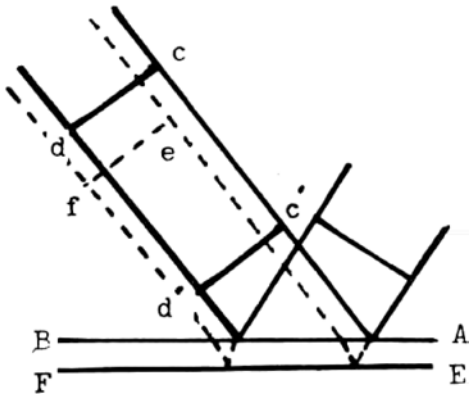


Figura 2. Explicación de Hooke de los colores de cuerpos delgados transparentes.

Si el cuerpo laminado es mucho más grueso, el pulso *ef* eventualmente va detrás del pulso *c'd'*. Entonces el pulso fuerte *c'd'* precede al pulso débil *ef* y aparece el rojo. Así los colores aparecen periódicamente al aumentar el grosor de la placa.

De esta explicación es aparente:

> ...que para la producción de los colores no es necesaria una gran refracción, como en el prisma; ni una determinación de luz y sombra, tal como ocurre tanto en el prisma como en la esfera de vidrio.[25]

Solo la disposición de pulsos fuertes y débiles determina el color de la luz. La sombra no tiene ningún papel esencial para la generación y determinación de los colores de la luz.

(3) La inmutabilidad de los colores de la luz

Cada uno de los colores de un rayo de luz, generados por un prisma, no puede ser cambiado a ningún otro al pasar por el segundo prisma, como demostró Newton en su *experimentum crucis* (figura 3). Newton escribió en su documento óptico de 1672 bajo la proposición 3:

> La especie de color y el grado de refrangibilidad propio a cualquier tipo particular de rayos no es mutable por refracción ni por reflexión de cuerpos naturales, ni por ninguna otra causa que yo pude aun observar.[26]

Esta afirmación evidentemente contradice la teoría de modificación de Aristóteles, que exponía que el primer prisma producía los colores al mezclar la luz con la oscuridad. De acuerdo con esta teoría, entonces, el segundo prisma, al mezclar más oscuridad y hacer los rayos menos brillantes, debe cambiar el espectro completo hacia el azul.

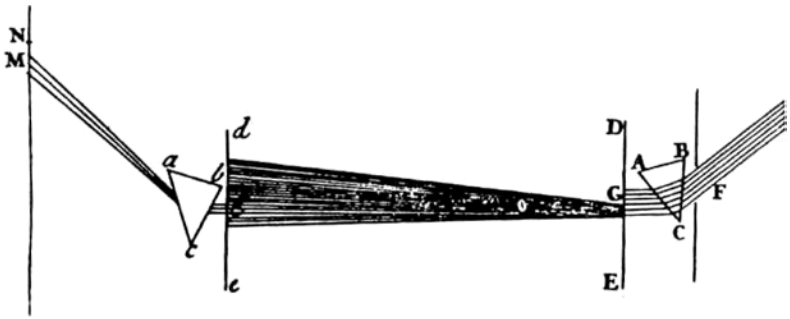


Figura 3. El *experimentum crucis* de Newton.

Hooke admitió esta inmutabilidad de los colores de la luz. Escribió:

> ...la tercera proposición, a la que sin duda asiento en todos los casos, excepto donde el rayo dividido es por otra refracción hecho entero o uniforme, para de nuevo divergir y separar....[27]

Los colores de rayos de luz son inmutables excepto cuando son reunidos para producir luz blanca.

La discusión anterior (1), (2), (3), prueba que Hooke no aceptaba el criterio (b). No era un defensor de la teoría aristotélica de los colores, aunque admitió el criterio (a).

Entonces, la controversia entre Hooke y Newton en 1672 no dependía de la teoría de modificación de Aristóteles, y la interpretación de Westfall, que considera a Hooke un defensor del concepto aristotélico de los colores, no sirve al caso. Debemos ahora examinar la alternativa, la interpretación de Sabra de la teoría de modificación.

2.2. La teoría de modificación como la teoría de los pulsos de luz: la interpretación de Sabra de la controversia Newton-Hooke

A. I. Sabra presenta su propia interpretación de la 'teoría de modificación' en su *Theories of Light from Descartes to Newton* (*Teorías de la luz desde Descartes hasta Newton*), que es considerada, contra su voluntad, como un estándar de historia de la óptica del siglo xvii. Supone que la controversia entre Newton y Hooke puede ser interpretada como el antagonismo entre el defensor de la teoría corpuscular de la luz y el de la teoría de pulsos de la luz. Escribe:

> Antes de él [Descartes], los autores sobre el tema se contentaban con explicar los colores como un resultado de la mezcla de luz y oscuridad, o de un número finito de colores 'primarios' en varias proporciones.[28]

Esto implica que, aunque la teoría de modificación existía antes de Descartes, Descartes no la adoptó, y que Hooke, seguidor de Descartes, no era un defensor de la teoría de modificación de colores de Aristóteles. Sobre la causa de la controversia entre Newton y Hooke, Sabra escribe:

> Newton concluyó, los colores no eran 'calificaciones' o modificaciones sufridas por la luz ante reflexión o refracción, como se asumía generalmente; eran '*propiedades originales* e *innatas*' de los rayos justo como lo eran sus grados respectivos de refrangibilidad.[29]

Y

> Fue esta interpretación de la constitución de la luz blanca y el papel que Newton le asignó al prisma en la producción de colores lo que ocupó la parte más grande y más importante de la controversia entre Newton y los críticos de su teoría, Hooke, Pardies y Huygens. Todos sospechaban por las expresiones de Newton que estaba inclinado hacia una interpretación atomista de la luz que a ellos incomodaba.[30]

> Hooke en particular preveía una nueva formulación de su hipótesis de pulsos que habría tomado en cuenta completamente los resultados experimentales sin conceder la heterogeneidad original de la luz blanca.[31]

Cuando Newton envió su 'Nueva teoría acerca de la luz y los colores', Hooke 'estuvo no poco complacido con la alegría y curiosidad de su observación [de Newton]' sobre la luz y 'estuvo totalmente de acuerdo con él sobre la verdad de aquellas que había alegado'.[32] Pero no podía asentir a la hipótesis de Newton que explicaba los fenómenos de los colores.

> Pero concedo su primera proposición, que la luz es un cuerpo, y que a tantos colores como grados de ellos como puede haber, tantos tipos de cuerpos puede haber, de los que todos compuestos formarían el blanco; y concedo además que todos los cuerpos luminosos están compuestos de tales sustancias condensadas, y que mientras brillan, continuamente envían una cantidad indefinida de ellos, en todas direcciones *in orbem*, que en un momento de tiempo se dispersa a los límites más lejanos y más indefinidos del universo; concediendo estas, digo, supongo que no habrá mayor dificultad en demostrar el resto de su curiosa teoría... Si mi suposición se concede, que la luz no es nada más que un movimiento simple y uniforme, o pulso de un medio homogéneo y adoptado (es decir transparente)... creo que el señor Newton no pensará difícil, por mi hipótesis, resolver todos los fenómenos...[33]

Newton hizo un contraataque.

> Para mí, la suposición fundamental [de la teoría de Hooke] en sí parece imposible; a saber, que las *ondas* o vibraciones de cualquier fluido pueden, como los rayos de luz, ser propagadas en líneas *rectas*, sin un esparcimiento y doblez continuo y muy extravagante en todas direcciones hacia el medio en reposo, donde son terminadas por él.[34]

Si el reconocimiento general hecho por los historiadores de la ciencia de que la teoría de modificación causó la controversia

entre Newton y Hooke es correcto, y al mismo tiempo, si la interpretación de Sabra de que los dos hombres disputaban sobre la teoría de los pulsos de la luz es correcta, es la consecuencia lógica que esa teoría de modificación que Hooke defendía es equivalente a la teoría de los pulsos de la luz o, más bien, a la teoría de color que está basada en la teoría de los pulsos de la luz. Así, la controversia entre Newton y Hooke era aquella entre la teoría corpuscular y la teoría de los pulsos de la luz.[35]

Newton suponía que el blanco era el agregado de los rayos de diferentes colores, que eran diferentemente refrangibles. Está claro que Newton adoptó la teoría corpuscular de la luz, aunque dudó en enunciarla explícitamente. Por tanto, el blanco era la agregación de todo tipo de corpúsculos y era originalmente heterogéneo. Hooke, por el contrario, adoptó la teoría de los pulsos de la luz. Para la teoría de pulsos el blanco era el color que exhibía un pulso de luz original uniforme. Los colores se generaban cuando este pulso uniforme era perturbado y destruido. Hooke llamó a esta perturbación 'la modificación de la luz'. Se debe notar que esta modificación era causada no por la mezcla de oscuridad con luz, sino por la división de un pulso de luz en pulsos fuertes y débiles en prismas o en cuerpos delgados transparentes. El orden de pulsos fuertes y débiles determinaba el color de la luz.

Era imposible para la teoría de los pulsos de luz suponer que cualquier tipo de luz fuera originalmente heterogénea, porque elementos respectivos del movimiento ondulatorio del éter en el espacio, tales como dirección, amplitud y frecuencia, no podían ser dos o más en un punto y tiempo dados. El movimiento debía ser uno definitivo porque solo había un éter cinético en el espacio. Hooke no podía entender por qué era necesario que los rayos que exhiben varios colores debieran existir originalmente en el pulso uniforme de blanco antes de la dispersión prismática.[36] Los colores eran procurados del blanco en el prisma. Hooke, sin embargo, admitió que

> Es verdad que puedo, en mi suposición, concebir que el blanco o movimiento uniforme de la luz está compuesto de los movimientos compuestos

> de todos los otros colores, como cualquier movimiento recto y uniforme puede estar compuesto de miles de movimientos compuestos, de la misma manera que Descartes explica la razón de la refracción; pero no le veo necesidad.[37]

Era posible para Hooke, como resume Sabra, *imaginar* que el blanco fuera heterogéneo, aunque no era heterogéneo en un sentido real o físico.[38]

Cuando la luz blanca, que consiste de un movimiento uniforme, pasa por un prisma, Hooke consideró que se resuelve en movimientos de pulso componentes de varios colores de los que se imaginaba que se componían. Pero una vez dividido, *un* movimiento componentes nunca era capaz de ser dividido o modificado de nuevo por otra refracción. Los rayos de luz eran inmutables por refracción. Sin embargo, era posible reducir los movimientos componentes a un pulso simple y uniforme como lo era al principio. Esta explicación de Hooke nos recuerda el análisis Fourier, como señala Sabra.[39] La explicación de Sabra no es enteramente irrelevante, aunque muchos historiadores de la ciencia pueden sentir que es un poco no histórica.

La teoría de modificación de los colores era para Hooke la teoría de color que estaba basada en la teoría de los pulsos de la luz. Aquí, la modificación no era causada por la mezcla de la oscuridad. Llamemos a este tipo de teoría de modificación 'teoría de modificación de Descartes-Hooke'.[40]

2.3. La teoría de modificación de colores en el periodo de Newton: la teoría reconsiderada

La discusión anterior demostró que la controversia óptica en 1672 entre Newton y Hooke estaba ocupada no con la teoría de modificación de Aristóteles, sino con la teoría de modificación de Descartes-Hooke. Sin embargo, queda un problema por resolver.

Sabra supone que el concepto de los colores de Aristóteles había sido aniquilado por Descartes y que no tuvo influencia en

Newton. Pero esta interpretación contradice la propia descripción de Newton en su cuaderno de estudiante, donde anotó:

> Los colores surgen ya sea de las sombras mezcladas con la luz o reflexión más fuerte y más débil.[41]

Esta es una descripción que aparentemente indica la influencia del concepto de los colores de Aristóteles sobre Newton. La dificultad de la interpretación de Sabra aquí puede ser fácilmente eliminada si solo suponemos que dos tipos de teorías de modificación coexistían en el periodo de Newton: la teoría de modificación de Descartes-Hooke y la teoría de modificación de Aristóteles.

Primero, Newton adoptó la teoría de modificación de Aristóteles, pero la abandonó gradualmente. Cuando disputó contra Hooke en 1672, solo atacó la teoría de modificación de Descartes-Hooke. Nunca atacó la teoría de modificación de Aristóteles, a la que en realidad Hooke no se suscribía en lo absoluto.

La teoría de modificación de Aristóteles era conocida en el periodo de Newton y ya había sido descrita en la obra de un filósofo natural inglés, Walter Charleton. Charleton era un filósofo mecánico en el siglo XVII e introdujo la filosofía corpuscular de Gassendi en Inglaterra. Charleton escribió su obra *Physiologia Epiculo-Gassendo-Charltoniana* en 1654,[42] y Newton leyó este libro en sus años de juventud. La afirmación de Newton citada antes se supone que se originó en la *Physiologia* de Charleton.[43] Ahí, Charleton escribió que el color blanco era causado por los átomos de luz que venían directamente del cuerpo luminoso y el negro era la negación de la luz.[44] Por tanto, el blanco era el color original de la luz. Los colores intermedios como el rojo, azul y verde,

> no son sino la descendencia de los extremos, surgiendo de la intermisión de luz y sombra, en varias proporciones, o, más simplemente, que el sentido de ellos es causado en la retina túnica, de acuerdo con la variedad de reflexiones y refracciones, que la luz incidente sufre por las partículas superficiales de objetos...[45]

Los colores eran, entonces, creados 'por una cierta *modificación*' de la luz.[46]

Charleton también dio una explicación de los colores prismáticos:

> ...los rayos de luz que arriban a la *base* del triángulo tienen su trayectoria a través por un camino o trayecto más largo que aquellos que llegan a la *cima* de ella o más cerca, y por tanto, siendo el vidrio muy grueso en esa parte, debe haber más partículas impermeables obsistentes a los rayos de luz; cada uno de los que repercute su rayo de vuelta hacia el medio del vidrio, causa que el número de sombras se multiplique en esa parte del objeto, que la base del triángulo respecta directamente, y en consecuencia produce una tintura cerúlea sobre ella.[47]

Él suponía que los colores eran generados por la mezcla de oscuridad con la luz blanca original. La luz, que contiene la mayoría de la oscuridad, es azul. Su teoría era una versión mecánica de la teoría de modificación de Aristóteles. El concepto de los colores de Aristóteles fue de esta forma transmitido al periodo de Newton.

Además, la coexistencia de las teorías de modificación de Aristóteles y de Descartes-Hooke es confirmada en un trabajo de Robert Boyle. Boyle escribió:

> Me inclino a considerar el color una modificación de la luz [...] Pero si pienso que esta modificación de la luz es realizada por mezclarla con sombras, o por variar la proporción del progreso y rotación de los glóbulos celestes cartesianos, o por alguna otra manera que ahora no he de mencionar, no pretendo declararlo aquí.[48]

Aquí, la modificación cartesiana se distingue de la modificación de Aristóteles. La coexistencia de dos tipos de teorías de modificación también es sugerida en los propios escritos de Newton. En *Lectiones Opticae*, Newton criticó la concepción peripatética de la luz y los colores, y entonces anotó:

> Hasta donde ocupan las opiniones de otros filósofos, ellos dijeron que los colores eran generados ya sea por sombra y luz con varias mezclas, o por la rotación de glóbulos o, más bien, sus varias presiones, o, finalmente, por varios modos con que algún medio etéreo era vibrado, mientras que la luz inmóvil era producida del impulso del éter vibrante que se carga en la retina túnica.[49]

Aquí él cita tres teorías de los colores: una versión revisada (quizá mecánica) del concepto aristotélico de los colores; el concepto cartesiano de los colores, y el de Hooke. Ya que Hooke adoptó la teoría cartesiana de la luz, podemos considerarlo como seguidor de Descartes. Y por Newton, la modificación de Descartes-Hooke era distinguida de la teoría de modificación de Aristóteles.

Pero entonces, ¿por qué tanto la concepción aristotélica de los colores como la de Descartes-Hooke eran llamadas 'teoría de modificación'? Es porque estas teorías suponían ambas que el blanco era el color original de la luz. Tales teorías que consideraban el blanco como el color original de la luz y que suponían que los colores eran generados al fabricar el blanco han sido llamadas 'teoría de modificación', ya sea que la modificación fuera causada por la mezcla de oscuridad o por la división del pulso de luz (criterio (a)).

Newton, quien defendía la teoría corpuscular de la luz, suponía que el blanco era el agregado de todos tipos de corpúsculos de luz y que era originalmente heterogéneo. No podía permitir el concepto de los colores de Aristóteles ni el concepto de los colores de Descartes-Hooke, porque ambos suponían que el blanco no era heterogéneo sino uniforme y que el blanco era el color que la luz original exhibía.

Aunque Newton adoptó la teoría de modificación de Aristóteles cuando inició su investigación óptica, gradualmente la abandonó. Criticó a Hooke no por la teoría de modificación de Aristóteles sino por la teoría de modificación de Descartes-Hooke.

Parte II

3. Newton y la teoría de modificación de los colores de Aristóteles

Como se ha mostrado en la parte I, existían dos tipos de la teoría de modificación en el tiempo de Newton: la de Aristóteles y la de Descartes-Hooke. La primera fue adoptada y revisada por Charleton, mientras que la segunda era una teoría de color basada en la teoría de los pulsos de la luz, con la que Newton no estaba de acuerdo. Cuando Newton inició su investigación de óptica en sus años de estudiante, adoptó la teoría de modificación de Aristóteles. Esta teoría, en realidad, habría de tener un papel positivo en la formación de la revolucionaria teoría de los colores de Newton. Aquí analizaré el cuaderno de estudiante de Newton llamado *Quaestiones*,[50] e intentaré elucidar el papel positivo de la teoría de modificación de Aristóteles en Newton.

3.1. El desarrollo de la teoría de los colores de Newton en su 'Quaestiones'

Como se indicó en las secciones anteriores, Newton inició su investigación con una versión mecánica de la teoría de modificación de Aristóteles. Escribió:

> Los colores surgen ya sea de las sombras mezcladas con la luz o de la reflexión más fuerte y más débil, o partes del cuerpo mezcladas con y cargadas por la luz.[51]

Pero Newton gradualmente llegó a abandonar el concepto de los colores de Aristóteles que había aprendido de la obra de Charleton.

> Ningún color surgirá de la mezcla de negro puro y blanco, ya que entonces las imágenes dibujadas con tinta, coloridas o impresas, parecerían coloridas a una distancia y los bordes de sombras estarían coloridos y el negro de humo y el blanco español[52] producirían colores de donde no pueden surgir de la reflexión de la luz mayor o menor o de sombras mezcladas con la luz.[53]

Aquí Newton eliminó (b) (parte I, §2.1), uno de los criterios de la teoría de modificación de Aristóteles.

Su teoría original del color apareció en las últimas entradas del mismo *Quaestiones*. Ahí hizo una descripción de un experimento. Pintó una placa cuadrada con dos colores y la miró a través de un prisma (figura 4).

Si abdc es blanca y cdsr negra entonces eodc es roja.
Si abdc es negra y cdsr blanca entonces eodc es azul.
Si abdc es azul y cdsr blanca entonces eodc es más azul.

Si (abdc) es	y (cdsr) es	entonces eodc es
blanca	azul	roja.
negra	azul	más azul.
azul	negra	verde o roja.
negra	roja	azul.
roja	negra	más roja.
roja	blanca	azul.
blanca	roja	más roja.
blanca	más blanca	azul.
más blanca	blanca	roja.
negra	más negra	verde o rojo oscuro.
más negra	negra	azul.

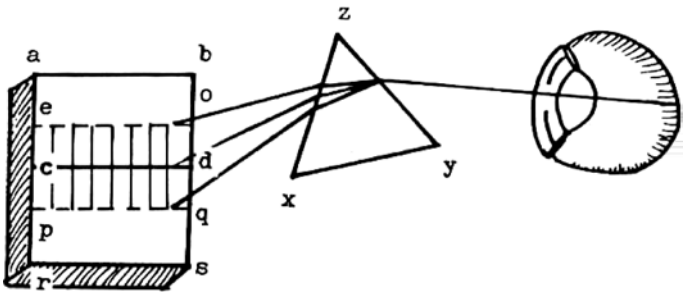


Figura 4. El 'experimento de placas' de Newton (de sus *Quaestiones*).

Newton supuso lo siguiente para explicar este experimento.

> A más uniformemente muevan los glóbulos a los nervios ópticos, lo más que los cuerpos parecen estar coloridos rojos, amarillos, azules, verdes, etcétera. Pero a más variadamente los mueven, lo más que los cuerpos aparecen blancos, negros o grises.[54]

Se supone que el blanco es una impresión hecha por la agregación de glóbulos de luz con movimientos variados. Por el tiempo en que Newton hizo esta descripción, reconoció la heterogeneidad de la luz blanca y abandonó (a), otro criterio de la teoría de modificación de Aristóteles.

Él siguió con la explicación de la causa de la producción de las franjas de color observadas. Supuso que los glóbulos de luz que construían el blanco se movían con diferentes velocidades respectivamente. Y,

> 1 Noto que los rayos movidos lentamente son refractados más que los rápidos. En segundo lugar, si adbc es sombra y cdsr blanco entonces los rayos movidos lentamente que vienen de cdqp serán refractados como si hubieran venido de eodc de manera que los rayos movidos lentamente siendo separados de los rápidos por refracción, ahí surgen dos tipos de colores, a saber: de los lentos azul, color del cielo, y púrpuras; de los rápidos rojo, amarillo, y de aquellos que no se mueven muy rápido ni muy lento surge verde, pero de los rayos de movimiento lento y rápido mezclados surgen blanco, gris y negro.[55]

Él asoció el color con la velocidad de la luz y entonces con su refrangibilidad. Un glóbulo que forma el rojo se mueve más rápido y es menos refrangible. Un glóbulo que forma el amarillo se mueve menos rápido y es más refrangible. Un glóbulo que forma el verde se mueve más lento y es mucho más refrangible, y un glóbulo que forma el azul se mueve más lento y es más refrangible.[56]

Por el tiempo en que hizo esta entrada, Newton abandonó ambos criterios de la teoría de modificación de Aristóteles. La descripción de Newton, sin embargo, preservó una característica importante del concepto de los colores de Aristóteles. De acuerdo con la teoría de modificación de la luz, la roja es la luz más fuerte porque contiene la menor oscuridad, y la azul es la luz más débil porque contiene la mayor oscuridad. Newton asoció al rojo con los glóbulos más rápidos y al azul con los más lentos. Por tanto, el rojo era la impresión hecha por los glóbulos de luz más fuertes y el azul era la impresión hecha por los más débiles. La teoría de Newton y la teoría de modificación de Aristóteles suponían ambas

que la roja era la luz más fuerte y la azul era la más débil.[57] A este respecto, la teoría del color de Newton tenía algo en común con el concepto de los colores de Aristóteles.

El rojo, la luz más fuerte en la teoría de Aristóteles, consistía de glóbulos con la velocidad más rápida, de acuerdo con Newton. Además, el rojo, el más rápido y más fuerte, era el menos refrangible, y el azul, el más débil y más lento, era el más refrangible. Así, cada rayo tiene su propia refrangibilidad de acuerdo con su fuerza o su velocidad.

Newton primero asoció los colores con velocidades de glóbulos de luz. Pero cambió su posición después en *Quaestiones* y relacionó los colores con las masas de los glóbulos (tabla).

Masa			Movimiento restante después de reflexión		
Partícula en el cuerpo	Rayos mayores	Rayos menores	Rayos mayores	Rayos menores	Color del cuerpo
12	9	2	1/7	5/7	Azul
2	9	2	7/11	0	Rojo

Tabla.

8. Aunque dos rayos sean igualmente rápidos, si un rayo es menor que el otro ese rayo tendrá un efecto mucho menor en el sensorio, ya que tiene menos movimiento que los otros, etcétera. De ahí suponiendo que hay partículas sueltas en los poros de un cuerpo que tiene proporción con los rayos mayores, como 12:9,[58] y los rayos menores están en proporción con los mayores de 2:9, los glóbulos mayores al chocar en tal partícula perderán 6/7 partes de su movimiento, el glóbulo menor perderá 2/7 partes de su movimiento, y el movimiento restante del glóbulo tendrá casi tal proporción uno al otro como tiene su cantidad, a saber 5/7:1/7::9:$1^{4}/_{5}$, que es casi 2 el glóbulo menor. Y tal cuerpo puede producir azules y púrpuras. Pero si las partículas en que los glóbulos se reflejan son iguales al glóbulo menor perderá su movimiento y el glóbulo mayor perderá 2/11 partes de su movimiento, y tal cuerpo puede ser rojo o amarillo.[59]

Cuando un cuerpo resta más movimiento de rayos mayores que de rayos menores, exhibe el azul. A saber, un cuerpo que refleja

más de rayos menores que de rayos mayores exhibe el azul. Por el contrario, un cuerpo que refleja más de rayos mayores que de rayos menores exhibe el rojo. Por tanto, el azul es la impresión de rayos menores y el rojo es la de rayos mayores. De nuevo aquí Newton vinculó los colores con la fuerza de la luz, una característica que queda de la teoría de Aristóteles.

Es sabido que en sus trabajos posteriores (por ejemplo *Lectiones Opticae*) Newton relacionó los colores con la masa o velocidad de los glóbulos de luz.[60] Incluso después de que llegó a su original y revolucionaria teoría de la luz y los colores, aun preservaba una característica importante de la teoría de modificación de Aristóteles, aunque descartó de esta última la uniformidad de la luz blanca.

3.2. La posición de Newton en la óptica del siglo xvii

La relación de la óptica de Newton con la de Descartes ha sido muy discutida por los historiadores de la ciencia.[61] De acuerdo con ellos, Newton, un filósofo mecánico, leyó la obra de Descartes, adoptó la ley de los senos de Descartes y escribió a la Sociedad Real que, cuando encontró su nueva teoría, se aplicó a 'el tallado de cristales ópticos de figuras distintas a la esférica' siguiendo a Descartes.[62] En otras palabras, se suponía que Newton había sucedido al programa de investigación óptica cartesiano.

Es verdad que Newton aceptó los logros de Descartes en óptica geométrica. Pero Descartes consideró a la luz como un pulso o acción en el éter como hizo Hooke, mientras que Newton la consideraba como corpúsculos en movimiento. Esta diferencia no ha sido tomada seriamente. Por tanto, quiero exponer una hipótesis de que había dos diferentes programas de óptica funcionando en el siglo xvii. Aunque ambos eran mecánicos y compartían la misma óptica geométrica, diferían en sus modelos de luz.

Uno era el programa de pulsos de luz, que suponía que la luz era un pulso o movimiento en el éter y explicaba los colores de acuerdo con la teoría de modificación de Descartes-Hooke. Descartes, Hooke y Pardies estaban suscritos a este. El otro era

el programa de corpúsculos de luz, que suponía que la luz estaba hecha de corpúsculos y explicaba los olores de acuerdo con la teoría de modificación de Aristóteles. Charleton, el joven Newton y otros aceptaban este programa. Newton aprendió de Charleton la teoría de modificación de Aristóteles, y parcialmente bajo su influencia formó su nueva teoría. Incidentalmente, es probable que el mismo Gassendi perteneciera a este programa, bajo cuya influencia Charleton escribió sus libros.[63]

Ahora es bastante aparente que Newton estaba fuertemente influenciado por los no-cartesianos de su tiempo, entre quienes el gasendista inglés Charleton escribió que la teoría de Descartes de la luz no había de ser

> nunca concedida por nadie que tema entramparse a sí mismo en muchas inextricables dificultades, incongruencias y contradicciones en la deducción de ella por todos los fenómenos de la luz, colores y visión...[64]

Por tanto, ya no es posible considerar a Newton solo como un sucesor de Descartes en relación con sus teorías ópticas.

4. Conclusión

La teoría de modificación de los colores era la teoría que consideraba que el blanco era el color original primario de la luz. Había dos versiones de la teoría de modificación en el periodo de Newton. Una era la teoría de modificación de Aristóteles, de acuerdo con la cual los colores eran generados por la mezcla de oscuridad en la luz. Charleton y el joven Newton se suscribieron a esta teoría, y sus características están en cierta forma preservadas incluso en la teoría madura de Newton. La otra era la teoría de modificación de Descartes-Hooke, que suponía que los colores eran producidos por la división de la luz blanca, mientras que la oscuridad no tenía ningún papel esencial. La primera era la teoría del color incorporada a la teoría corpuscular de la luz y la última era esa con la teoría de los pulsos de la luz.

Los primeros estudios de óptica del siglo XVII soslayaron la coexistencia de los dos tipos de teoría de modificación. Notablemente, Westfall, consciente solo de la teoría de modificación de Aristóteles en el tiempo de Newton, falló en interpretar adecuadamente la controversia óptica, mientras que Sabra explicó la controversia con éxito pero no pudo tratar consistentemente con la discusión de Newton en su cuaderno de estudiante, *Quaestiones*.

La demarcación de los dos tipos de teoría de modificación propuesta en este documento presenta una nueva interpretación comprehensiva de *Quaestiones* de Newton, así como de su controversia con Hooke. Puede también sugerir una nueva historiografía de la óptica del siglo XVII.

RECONOCIMIENTO

Deseo expresar mi sincera gratitud al profesor Masao Watanabe por su abundante ayuda e inspiración.

NOTAS

1 T. S. Kuhn notó que existía más de una versión de las teorías de modificación antes de Newton. Pero no discutió su papel en el tiempo de Newton. T. S. Kuhn, 'Newton's Optical papers', en *Isaac Newton's Papers and Letters on Natural Philosophy* [en adelante *Papers and Letters*], editado por I. B. Cohen (Cambridge, Massachusetts, 1978), pp. 27-45 (pp. 30-1) [incluido en este volumen como "Los documentos de óptica de Newton"].

2 El Profesor Zev Bechler sugiere que su diferencia en metodología era otra raíz de su controversia. Zev Bechler, 'Newton's Optical Controversies: A Study in the Grammar of Scientific Dissent', en *The Interaction Between Science and Philosophy*, editado por Yehuda Elkana (Atlantic Highland, N.J., 1974), pp. 115-42. Este aspecto de su controversia no se discutirá en este texto, aunque me parece muy importante.

3 *Papers and Letters*, p. 53. También en *The Correspondence of Isaac Newton*, editada por H. W. Turnbull (Cambridge, 1959), I, 97. Ver también *The History of the Royal Society*, editado por Thomas Birch (Londres, 1756-7), III, 9.

4 *Papers and Letters*, pp. 112-3. Sobre la respuesta de Newton a la crítica de Hooke ver ibíd., pp. 116 y ss.

5 R. S. Westfall: 'The Development of Newton's Theory of Color', *Isis*, 53 (1962), 339-58 (pp. 342-3) [incluido en este volumen como "El desarrollo de la teoría del color de Newton", p. 105].

6 Ibíd.

7 Ibíd., p. 347.

8 Ibíd., p. 348.

9 Ibíd., p. 353.

10 Ibíd., p. 354.

11 R. S. Westfall, *The Construction of Modern Science: Mechanism and Mechanics* (Nueva York, 1971), p. 56; *Never at Rest* (Cambridge, 1980), p. 166. S. I. Vavilov, un famoso académico ruso de la óptica newtoniana, tiene casi la misma opinión de Westfall. S. I. Wawilow [Vavilov]: *Isaac Newton* (Leipzig, 1951), traducido del ruso al alemán por J. Gruen, capítulos 3 y 5. Escribió: 'Die Physik übermittelte Newton die traditionellen Anschauungen des Aristoteles in fast unveränderter Form. Man nahm, dass die Farben aus einer Vermischung des Lichts mit der Dunkelheit in verschiedenen Proportionen entstehen' (p. 20). En Japón, T. Hirosige adoptó la interpretación de Westfall en su *History of Physics* (en japonés), 2 vols. (Tokio, 1968).

Westfall, en su 'Newton and his Critics on the Nature of Colors' (*Archives internationale d'Histoire des Sciences*, 15 (1962), 47-58), presentó otro punto de vista de que la raíz de la controversia entre Newton y sus críticos

(incluyendo a Hooke) consistió en la incomprensión de los críticos de que Newton apoyaba la concepción peripatética de las cualidades reales. Contra este punto de vista, A. I. Sabra escribió: 'Esto me parece que coloca el énfasis en el lugar erróneo. La sospecha de conceptos peripatéticos en la doctrina de los colores de Newton era solo una salida en falso' (ver el libro de Sabra citado en el escolio 27, pp. 232-3). Estoy de acuerdo con Sabra.

12 *Papers and Letters*, p. 111.
13 Westfall (escolio 5), pp. 347-8.
14 R. Hooke, *Micrographia* (Londres, 1665), p. 64.
15 Ibíd., p. 63.
16 Ibíd.
17 Ibíd.
18 Ibíd., p. 53.
19 N. del t.: se refiere a Francis Bacon.
20 *Micrographia*, p. 54.
21 Ibíd., p. 64.
22 Ibíd., p. 65.
23 Ibíd., p. 66.
24 Ibíd.
25 Ibíd., p. 54.
26 *Papers and Letters*, p. 53.
27 Ibíd., p.113.
28 A. I. Sabra, *Theories of Light from Descartes to Newton* (Londres, 1967), p. 67.
29 Ibíd., p. 241.
30 Ibíd., p. 242.
31 Ibíd., p. 233.
32 *Papers and Letters*, p. 110.
33 Ibíd., p.114.
34 Ibíd., p.121.
35 Shapiro también supone que la base de la controversia entre Newton y sus críticos yace en el conflicto entre la teoría de emisión (corpúsculos) y ondas (pulsos) de la luz. A. E. Shapiro, 'Newton's Definition of a Light Ray and the Diffusion Theories of Chromatic Dispersion', *Isis*, 66 (1975), 194-210 (p. 194).
36 *Papers and Letters,* p. 111.
37 Ibíd., p. 114.
38 Sabra (escolio 27), p. 280.
39 Ibíd., pp. 280-1.
40 Aunque Westfall supuso que Descartes adoptó la teoría de modificación de Aristóteles, su opinión no es apropiada, porque Descartes escribió:

> Pero reconozco que la sombra y la refracción no son siempre necesarias para producirlos [a los colores]; y que en vez de estas el tamaño, forma, situación y movimiento de las partículas de los cuerpos que llamamos coloridos pueden competir variadamente con la luz, para aumentar o disminuir la rotación de las partículas del material fino [*Oeuvres de Descartes*, editadas por C. Adam y P. Tannery, 12 vols., París, 1897-1913, IV; *Discourse on Method, Optics, Geometry and Meteorology*, traducido al inglés por Paul J. Olscamp, Indianapolis, 1965, pp. 338-9].

Debemos notar que Descartes se rehusó a admitir la distinción entre colores verdaderos y aparentes. La sombra ya no era esencial para la producción de ningún color. Los colores eran generados no por la mezcla de oscuridad a la luz sino por la rotación de partículas de éter.

41 Cambridge University Library, MS. Add. 3996, folio 105v.

42 W. Charleton, *Physiologia Epiculo-Gassendo-Charltoniana* (Londres, 1654; reimpresión Nueva York, 1966). Respecto a Charleton, ver H. Rolleston, 'Walter Charleton, D. M., F. R. C. P., F. R: S.', *Bulletin of the History of Medicine*, 8 (1940), 403-16, y la introducción a la reproducción de *Physiologia* por R. H. Kargon. Ver también de Kargon 'Walter Charleton, Robert Boyle, and the Acceptance of Epicurean Atomism in England', *Isis*, 55 (1964), 184-92, y *Atomism in England from Harriot to Newton* (Oxford, 1966), sección 8; Lindsay Sharp, 'Walter Charleton's Early Life 1620-1659, and Relationship to Natural Philosophy in Mid-seventeenth Century England', *Annals of Science*, 30 (1973), 311-40.

43 J. Hendry, 'Newton's Theory of Colour', *Centaurus*, 23 (1980), 2030-51 (pp. 233-34).

44 Charleton (escolio 41), p. 191.

45 Ibíd., pp. 191-2.

46 Ibíd., p. 190.

47 Ibíd., p. 194.

48 R. Boyle, *Experiments and Considerations Touching Colours ... the Beginning of an Experimental History of Colours* (Londres, 1664; reimpresión Nueva York, 1964), p. 90.

49 I. Newton, *Lectiones Opticae*, en *Isaac Newtoni Opera Quae Exstant Omnia*, editada por S. Horsley (Londres, 1782), III, (reimpresión, Stuttgart and Bad Connstatt. 1964), p. 351.

50 Cambridge University Library, MS. Add. 3996, folios 88-135. Los siguientes textos tratan a detalle el Add. 3996: A. R. Hall, 'Sir Isaac Newton's Note-Book, 1661-65', *Cambridge Historical Journal*, 9 (1948), 239-50; R. S. Westfall, 'The Foundations of Newton's Philosophy of Nature', *British Journal for the History of Science*, 1 (1962), 171-82; J. A. Lohne, 'Isaac Newton: The Rise of a Scientist 1661-1671', *Notes and Records of the Royal Society of London*, 20 (1965), 125-39. En relación con el aspecto

óptico del cuaderno ver Westfall, escolio 5, y Hendry, escolio 42.

51 MS Add. 3996, folio 105v. La tercera alternativa de que 'los colores son partes del cuerpo mezcladas con y cargadas por la luz' parece también derivada de *Physiologia* de Charleton (ver p. 185). Charleton la atribuyó a Epicuro. Esta alternativa, sin embargo, no tuvo influencia en el desarrollo posterior de Newton.

52 "Lamb black" (*lamp-black*), un pigmento consistente de carbón casi puro en estado de división fina; "spanish whiteing" (*Spanish whiting*), gis finamente molido que se usa como pigmento o para aprovechar sus propiedades limpiadoras (n. del t.: véase J.E. McGuire y Martin Tamny, *Certain Philosophical Questions. Newton's Trinity Notebook*, "Glossary", Cambridge University Press, 1983).

53 MS Add. 3996, folio 105v.

54 Ibíd., folio 122r.

55 Ibíd., folio 122v.

56 El experimento en las franjas de color observadas con un prisma no era original de Newton. Podemos encontrar un experimento similar en *Physiologia* de Charleton:

> [...] observemos aquí, que los colores creados por la luz, reflejados de objetos sobre el prisma, y ahí refractados dos veces, son duplicados de ahí a ambos lados. Ya que, mientras que aquellos colores no son copiados sino en los extremos del objeto, o donde la superficie es desigual (porque si es plana y suave, solo admite un color uniforme, y el mismo que aparece sobre ella, cuando se observa sin el prisma): por tanto los dos colores siempre observados en ese extremo del objeto, que respecta la base del triángulo en el vidrio, y aquellos son un bermellón y un amarillo; y otros dos colores en ese extremo, que respectan la cima del triángulo, y aquellos son un azul violeta y verde pasto [p. 189].

Creo que es posible que el 'experimento de placas' de Newton fue hecho bajo la influencia de este experimento. Lo intentó con una acomodación más exquisita, es decir, con las placas de colores.

57 Para explicar su teoría del color, Newton también explicó los colores en la superficie de los cuerpos.

> 4. De ahí el rojo, amarillo, etcétera, son formados en los cuerpos al detener los rayos movidos lentamente sin retrasar mucho los rayos más rápidos, y el azul, verde y púrpura al disminuir el movimiento de los rayos más rápidos y no de los más lentos. O en algunos cuerpos todos estos colores pueden surgir al disminuir el movimiento de todos los rayos en mayor o menor proporción geométrica, ya que entonces habrá menos diferencia en sus movimientos que de otra forma.

58 No es 12:9 sino 9:12 en la escritura original de Newton. Pero la transposición parece razonable, o si no contradice el argumento siguiente. Ver Hendry (escolio 42), pp. 240-2.

[59] MS Add. 3996, folio 123r.

[60] Zev Bechler, 'Newton's Search for a Mechanistic Model of Colour Dispersion: A Suggested Interpretation', *Archive for History of Exact Sciences*, 11 (1973), 1-37.

[61] Sabra (escolio 27), p. 13. Aquí sugiere la fuerte influencia de Descartes sobre Newton. Ver también A. R. Hall, 'Further Optical Experiments of Isaac Newton', *Annals of Science*, 11 (1955), 27-43 (p. 36).

[62] *Papers and Letters*, p. 47.

[63] Gassendi, como Charleton, suponía que los colores provenian de la mezcla de sombra y luz: *Syntagma Philosophicum* (*Opera Omnia*, Lyon, 1658, I, p. 434). Ver Westfall (escolio 49), p. 175, nota 10.

[64] Charleton (escolio 41), p. 197.

El debate inicial con respecto a la teoría ondulatoria

August Ziggelaar

"The early debate concerning wave-theory". Publicado en *Hegel and newtonianism*, Holanda, Klwer Academic Publisher, 1993. Pp. 517-529. © **2015 Copyright Clearance Center, Inc.**

A. La controversia inicial

1. *Principios* de Newton

En 1687 Newton publicó su trabajo sobre los *Principios matemáticos de la ciencia natural* –así es como podemos traducir su título en latín. Por medio de la segunda, o ley de la fuerza, y la ley de la atracción gravitacional universal, fue capaz de explicar la mecánica del sistema solar. Fue así que estableció su fama y su autoridad en las ciencias exactas. Y su fama fue tal que hasta el final del siglo XVIII y después el autor mismo era tan reverenciado como sus trabajos.

El primero de los tres libros de *Principios* cierra con la sección catorce, que se ocupa del movimiento de cuerpos muy pequeños atraídos por fuerzas centrales hacia las partículas de un cuerpo grande. En las proposiciones noventa y cuatro a noventa y seis, Newton deriva la ley de los senos de refracción y la ley de reflexión.[1] En el escolio que sigue a la proposición noventa y seis, compara sus resultados con las leyes de luz correspondientes, haciendo mención de Snell y de Descartes, y también de Grimaldi, por causa de los experimentos de difracción por los que había demostrado que los rayos de luz se desvían alrededor de los cuerpos, "como si fueran atraídos hacia ellos" –como Newton lo expresa. En las proposiciones noventa y siete y noventa y ocho aplica sus resultados a la luz, después de rematar el escolio que sigue la proposición noventa y seis anunciando que no tiene la intención de discutir la naturaleza de los rayos de luz, esto es, decidir si pueden o no ser considerados como cuerpos.[2]

Entre los propósitos principales de *Principios* de Newton se encuentra la refutación de la teoría-vórtice de Descartes sobre el sistema solar, que había sido expuesta en sus *Principios de filosofía*, publicado en 1644. Newton dedicó el segundo libro de

su trabajo principalmente a este fin. La teoría-vórtice suponía que todo el espacio está ocupado por ciertos tipos de materia tenue o éter. En ciertas teorías, tal materia también era postulada para explicar las propiedades de la luz. La sección ocho del segundo libro de *Principios* trata la propagación de los movimientos a través de los fluidos. Las proposiciones cuarenta y uno y cuarenta y dos prueban que ya que tanto la presión como cualquier movimiento propagado en un fluido se esparcen en todas direcciones, esto no puede explicar la propiedad más simple de la luz, su propagación en líneas rectas. En el corolario a la proposición cuarenta y tres, Newton rechaza la idea que el movimiento del calor en una flama pueda ser una fuente de propagación ondulatoria. No menciona ningún nombre ni se refiere a ninguna publicación. No obstante, queda claro que esta proposición tenía la intención de refutar las teorías de la luz expuestas por Descartes y Hooke.[3]

Una onda es en esencia algo que se propaga por el espacio sin el movimiento concomitante de la materia. Se puede decir, por tanto, que la teoría ondulatoria de la luz tuvo su origen en la doctrina de Descartes, quien en su *Dióptrica*, publicado en 1637, y en su *Principios*, publicado en 1644, sugería que la luz consiste de ciertos conatos centrífugos. En 1665 Hooke expuso otra teoría ondulatoria de la luz en su *Micrographia*. Sugirió que es la propagación de un movimiento vibratorio de amplitud extremadamente menuda.[4] De acuerdo con su teoría, es excitada por las partículas vibrantes del cuerpo luminoso y propagadas en líneas rectas que se extienden por todas direcciones, como rayos desde el centro de una esfera, o como los anillos de ondas en la superficie del agua.[5] Tanto Descartes como Hooke sostenían que la propagación de la luz no involucra tiempo. Si el movimiento a una velocidad finita se considera esencial para un movimiento ondulatorio, sus hipótesis con respecto a la luz no pueden ser consideradas como teorías ondulatorias. Sin embargo, además de esto, contienen todo lo que es esencial para una teoría ondulatoria.

Newton claramente tenía la intención de refutar estas dos teorías ondulatorias en la sección ocho del segundo libro de

Principios, en el que niega cualquier validez de la analogía entre la propagación de las olas en el agua y las ondas de sonido, y las vibraciones de una partícula en un fluido tenue. En 1672, en una carta a Henry Oldenburg escrita el 11 de junio, había objetado de la teoría ondulatoria de Hooke que

> la suposición fundamental en sí misma parece imposible, a saber, que las olas o vibraciones de cualquier fluido pueden propagarse en líneas rectas como los rayos de luz, sin desviarse y doblarse de forma continua y extravagante por todos lados hacia el medio inactivo, donde terminan por causa de él. Estoy equivocado si no hay *experimento* y *demostración* de lo contrario.

En una carta escrita a Henry Oldenburg el 7 de diciembre de 1675 y leída posteriormente en reuniones de la Sociedad Real, señaló que si la luz consistía de tales vibraciones del éter, "debería siempre limitar copiosamente en líneas torcidas hacia el medio oscuro o inactivo, destruyendo todas las sombras, y corresponder fácilmente con cualesquiera poros o pasajes torcidos, como hacen los sonidos".[6]

2. Las partículas chocantes de Huygens

Ya que *Principios* de Newton apareció en 1687, él podría ya haber oído de la teoría ondulatoria de la luz de Huygens mientras preparaba el libro para su publicación. Huygens la había formulado por primera vez en 1677, durante una estadía en Holanda. En 1678 había disertado sobre ella en reuniones de la Academia de Ciencias de París. Inspirado por un tratado manuscrito redactado por el jesuita Ignace Gaston Pardies en 1673,[7] había intentado explicar la ley de refracción haciendo uso de la teoría ondulatoria. En 1677 incluso había explicado exitosamente el extraño fenómeno de la doble refracción del espato de Islandia por medio de la teoría.[8] Lo hizo introduciendo el concepto de óndulas elementales, emitidas por cada punto al que llega un rayo de luz, en todas direcciones. Suponía que las óndulas individuales eran inobservables, y sugirió que solo en áreas donde muchas óndulas se reforzaran una a la otra producirían luz perceptible. De esta

forma fue capaz también de explicar geométricamente no solo la refracción sino también la reflexión, y de formular leyes correspondientes para estos fenómenos. Sin embargo, se dio cuenta de que tenía que explicar primero la propagación rectilínea de la luz. En 1690, después de estudiar los *Principios* de Newton, publicó su *Tratado sobre la luz*. En este trabajo se enfrentó a los argumentos de Newton contra las teorías ondulatorias, basados principalmente en el fenómeno innegable de la propagación rectilínea de la luz. En general tuvo bastante éxito haciendo uso de su propio principio de óndulas secundarias, aunque falló en considerar el hecho de que la luz puede, hasta cierto punto, desviarse alrededor de un obstáculo. El jesuita Francisco María Grimaldi (1618-1662) lo había descubierto algún tiempo antes, y proveyó una amplia descripción en un trabajo publicado póstumamente en 1665.[9]

Huygens concebía la luz como la propagación de colisiones entre partículas, reduciéndola por tanto a un fenómeno mecánico. Desde el inicio mismo de su libro, estaba convencido que en cualquier ciencia verdadera uno concibe la causa de todos los efectos naturales en términos puramente mecánicos.[10] A este respecto particular, demostró cuán profundamente influenciado estaba por la filosofía mecanicista de Descartes. Su teoría ondulatoria de la luz presuponía un medio material, aunque la moción en sí no estaba concebida como un fenómeno material, sino como uno mecánico, una colisión. Cuando se concibe así, la teoría ondulatoria de la luz es una doctrina que se ocupa de cuerpos, tal como la teoría de las partículas, que se basa en la idea de que la luz consiste en el movimiento de partículas a través del espacio. Newton sostenía que "la luz es igualmente un cuerpo" tanto en la teoría de partículas como en la ondulatoria, y añadía que "la única diferencia es que en un caso un rayo no es un cuerpo, en el otro es muchos".[11] Se dio cuenta, por lo tanto, de que el rayo es entonces la propagación de movimiento o presión o colisiones a través de un atavío de partículas.

3. Primeras críticas

Newton había sostenido objeciones a la teoría ondulatoria de la luz de Hooke desde 1675. Una de las más reveladoras está basada en el fenómeno de la reflexión interna total. Los rayos desde dentro, incidentes en la superficie del vidrio a un ángulo mayor que alrededor de 42º serán reflejados completamente, sin emerger al aire uno de ellos. Newton comentó:

> No veo cómo alguna superficie (como el lado de un prisma de vidrio, en que los rayos dentro son incidentes a un ángulo de más de cuarenta grados) puede ser totalmente opaca. Pues las vibraciones que chocan contra el confín refractante del éter más raro y más denso deben hacer que las superficies manipulables ondulen, y esas ondulaciones agitarán y provocarán vibraciones del otro lado.[12]

Después de la publicación de Huygens de su teoría ondulatoria en 1690, Halley reaccionó a ella en *Philosophical Transactions*. Huygens había asumido que la velocidad de la luz era menor en medios más densos y mayor en medios más raros. ¿Qué es, entonces, lo que hace que la luz acelere de nuevo cuando pasa de un medio denso hacia uno más raro? ¿Cómo puede cualquier cuerpo ser opaco si el éter existe en todos lados, incluso en los cuerpos más opacos? Sin embargo, Halley escribió en 1693 que "es muy probable" que la luz sea una ondulación del éter.[13]

En 1713, Roger Cotes escribió un prefacio a la segunda edición de *Principios* de Newton, en el que observó que si existió un éter, este actuaría como freno en el movimiento de los planetas. Este argumento, tomado desde el punto de vista de la mecánica, también tendía a socavar la plausibilidad de las teorías ondulatorias en la óptica.

B. A favor y en contra

1. Las reflexiones de Malebranche

Durante el mismo año en que Newton publicó *Principios*, el sacerdote y filósofo francés Nicolas de Malebranche publicó sus *Discourses on Metaphysics and Religion* [*Discursos sobre metafísica y religión*]. En su decimosegundo *discurso* sostenía que cuando las superficies de los cuerpos reflejan la luz, modifican la presión de la que Descartes considera que consiste la luz, dando lugar a las diferentes vibraciones correspondientes a las sensaciones que tenemos de los diferentes colores.[14] En 1699 leyó una disertación en una reunión de la Academia de Ciencias de París, titulada *Reflexiones sobre la luz y los colores, y sobre la engendración del fuego*, en la que sugirió que el medio en que la luz se genera es un éter. En las teorías de Huygens y Descartes se concebía que el éter consistiera de pequeñas esferas. Melabranche lo consideraba como consistente de pequeños vórtices, que en sí mismos estaban compuestos de una materia muy fluida y agitada, capaz de recibir y comunicar diversas impresiones. Por lo tanto, la luz consiste no solo en la propagación de la presión, sino en un exceso de presión y de las vibraciones de presión dentro de este medio sutil. La luminosidad es una función de la fuerza de las vibraciones, y el color que se percibe depende de su frecuencia. Las *Reflexiones* no se publicaron hasta 1712, pero la teoría de Malebranche se hizo accesible a lectores en inglés en 1704, cuando John Harris la mencionó en el primer volumen de su *Lexicon Technicum*.[15] En 1712, Malebranche volvió a publicar su trabajo principal, *Sobre la búsqueda de la verdad*, con algunas *Elucidaciones*, de las que la decimosexta es una versión revisada de las *Reflexiones*. Ahora trata de derivar las leyes de reflexión y refracción

> de la fuerza centrífuga de los vórtices de la materia sutil que los comprime entre sí mismos y todos los cuerpos que los rodean, para mantener el equilibrio entre fuerzas contrarias, de acuerdo con la ley de la naturaleza de que cada cuerpo cede en la dirección en la que se presiona menos.[16]

En 1699 había aceptado la prueba de Ole Rømer de la velocidad finita de la luz. Ahora, en 1712, por la autoridad de Jean-Dominique Cassini, regresó a la convicción de que la luz pasa en un instante desde su fuente hasta las distancias más grandes.[17] La otra novedad en esta versión de su óptica ha de encontrarse en su teoría de los colores, y fue ocasionada por un importante libro de óptica que había aparecido mientras tanto y por el cual había sido influenciado. Ahora consideraremos este trabajo.

2. *Óptica* de Newton

Cuando Newton publicó *Óptica* en 1704, tenía conocimiento de la teoría ondulatoria de la luz de Huygens por el libro publicado catorce años antes. En el libro dos, parte tres, proposición ocho de *Óptica*, Newton parecería atacar la explicación de Huygens de la reflexión. Enuncia la proposición como sigue: "La causa de la reflexión no es el choque de la luz en las partes sólidas o impermeables de los cuerpos, como se cree comúnmente". Al discutir el cristal pulido, argumenta que su superficie aun tiene rasguños y mellas, solo que

> demasiado pequeños para ser visibles. Y por lo tanto si la luz fuera reflejada al chocar en las partes sólidas del vidrio, sería esparcida por el vidrio más pulido tanto como por el más áspero. Entonces sigue siendo un problema cómo es que el vidrio pulido por sustancias corrosivas puede reflejar la luz de forma tan regular como lo hace. Y este problema tiene escasa solución a no ser diciendo que la reflexión de un rayo se efectúa no por un punto individual del cuerpo reflectante, sino por algún poder del cuerpo que se difunde uniformemente por toda su superficie y por el que actúa sobre el rayo sin contacto inmediato. Que las partes de los cuerpos actúan sobre la luz a distancia se demostrará en lo sucesivo.

Huygens, sin embargo, había resuelto este problema postulando un frente de onda como la superficie en la que las óndulas secundarias se reforzaban una a la otra.

El libro tres se ocupa de la "inflexión", que es el término de Newton para la difracción de la luz, descubierta y descrita en detalle por Grimaldi,[18] ya mencionada por Newton en el libro uno

de *Principios* –el escolio que sigue a la proposición noventa y seis, donde describió la difracción de los rayos de luz dentro de la sombra definida geométricamente. En el libro tres de *Óptica* solamente describe sus propios experimentos con la desviación de la luz fuera de la sombra. Grimaldi, sin embargo, describió ambos fenómenos. También había descrito un experimento en el que la adición de luz a la luz había provocado oscuridad.[19] Para nosotros hoy en día esta es una clara demostración de que la luz consiste de ondas que pueden interferirse recíprocamente de manera destructiva. Quizá Newton jamás leyó el libro de Grimaldi, pero ya que sabía bastante de él, su silencio sobre secciones importantes puede ser evidencia de sus reservas. Newton llevó a cabo experimentos con un cabello humano que pudieron haber revelado un patrón de interferencia dentro de la sombra. Es posible, empero, que le fuera imperceptible.[20]

Después de describir sus experimentos con difracción, Newton concluyó "proponiendo solo algunas Cuestiones, para que otros hagan una búsqueda más extensa". La primera edición de *Óptica* contiene dieciséis de esas Cuestiones; la edición latina de 1706 tiene siete más, numeradas 17-24; la edición de 1717 tiene ocho nuevas, numeradas 17-24, con las nuevas Cuestiones de la edición latina numeradas 25-31. En la Cuestión diecisiete (1706, 25 en 1717), Newton describe la doble refracción del espato de Islandia. Huygens había explicado el fenómeno por medio de su teoría ondulatoria, y había encontrado la regla exacta para ello. Newton entonces describe el descubrimiento hecho por Huygens de la propiedad de la luz que llamaremos polarización. Un cristal de espato de Islandia, esto es, de calcita, por medio de la doble refracción, produce dos rayos de luz desde un rayo incidente. Otro cristal doblaría los rayos otra vez a cuatro, aunque no cuando los dos cristales tengan la misma orientación. Huygens admitió que no podría explicarlo por medio de su teoría ondulatoria. Newton introduce la Cuestión preguntando: "¿No hay otras propiedades originales de los rayos de luz, además de aquellas ya descritas?" En la siguiente Cuestión sugiere una respuesta: "¿No tienen

los rayos de luz varios lados, dotados de varias propiedades originales?" Las posiciones de los lados de un rayo con respecto al cristal podrían determinar su comportamiento en la doble refracción, así también explicando la observación de Huygens de los dos cristales.

En la Cuestión diecinueve (1706, 27 en 1717), Newton rechaza todas las teorías de la luz que explican los fenómenos ópticos por nuevas modificaciones adquiridas por la luz a su encuentro con la materia. Esto también debió estar dirigido a la teoría fluida de la luz de Grimaldi, ya que Grimaldi había intentado explicar tanto los colores como las franjas de difracción por un movimiento vibratorio y ondulatorio adquirido por la luz cuando al encontrarse con obstáculos.

En la Cuestión veinte (1706, 28 en 1717), Newton ataca las teorías ondulatorias de la luz:

> ¿No son erróneas todas las hipótesis en que se supone que la luz consiste en presión o movimiento propagados por un medio fluido? En todas estas hipótesis los fenómenos de la luz han sido explicados hasta ahora suponiendo que surgen de nuevas modificaciones de los rayos, lo que es una suposición errónea. Si la luz [...] consistiera en presión o en movimiento, propagada en un instante o en algo de tiempo, se desviaría hacia la sombra.

Este es el argumento de *Principios*, repetido a pesar de la explicación de Huygens de la propagación en líneas rectas, pero ahora con la especificación de que la luz se desviaría *hacia* la sombra –el fenómeno que Newton había considerado antes y que había descrito Grimaldi, pero que había sido ignorado en la mayor parte de *Óptica*.

El siguiente argumento fue tomado de los experimentos de Huygens con dos cristales de calcita: "Parece, por esos experimentos, que los rayos de luz tienen diferentes propiedades en sus diferentes lados".[21] Aquí es donde Newton menciona la admisión de Huygens de haber sido incapaz de explicar su propio descubrimiento –por cierto, la única cita directa del *Tratado sobre la luz* de Huygens en todo el volumen de *Óptica*. Newton explica el fenómeno invocando las disposiciones que existen en los rayos

"desde el principio", antes de interactuar con los cristales. "Para mí, al menos", escribe Newton, "esto parece inexplicable, si es que la luz no es nada más que la presión o movimiento propagados por el éter". Continúa con el argumento de Cotes contra el éter:

> Una gran objeción surge de los movimientos regulares y durables de los planetas y los cometas en todas las formas de trayectorias por los cielos. Ahí se manifiesta que los cielos están faltos de toda resistencia sensible, y por consecuencia de toda materia sensible [...] Y por lo tanto para dar lugar a los movimientos regulares y durables de los planetas y cometas, es necesario vaciar los cielos de toda materia, excepto quizá de algunos vapores muy delgados, vahos o efluvios, que surgen de las atmósferas de la Tierra, los planetas y los cometas, y de ahí un medio etéreo en exceso raro como el descrito arriba.

Aquí se refiere a su intento de explicar "accesos de fácil reflexión y fácil transmisión". Entonces continúa:

> Un fluido denso no puede servir para explicar los fenómenos de la naturaleza, los movimientos de los planetas y cometas se explican mejor sin él. Sirve solo para perturbar y retardar los movimientos de aquellos grandes cuerpos, y hacer languidecer el sistema de la naturaleza. Y en los poros de los cuerpos, sirve solo para detener los movimientos vibratorios de sus partes, en donde se consiste su calor y su actividad.

Por último, contrasta "la autoridad de aquellos filósofos más antiguos y más celebrados", que fueron atomistas, con científicos posteriores, "que asumen hipótesis para explicar todas las cosas de manera mecánica", observando que:

> Mientras que el principal asunto de la filosofía natural es discutir los fenómenos sin asumir hipótesis, y deducir las causas de los efectos, hasta que se llegue a la primera causa, que desde luego no es mecánica.

En *Principios*, Newton había explicado la reflexión y la refracción por fuerzas de atracción y propulsión, como hizo en la Cuestión veintiuno (1706, 29 en 1717) de *Óptica*. En la edición de 1717 de este último trabajo introdujo nuevas Cuestiones, numeradas diecinueve y veinte, en las que era partidario de diferentes densidades de un medio etéreo dentro y alrededor de la materia sólida, para explicar la refracción y la difracción. La

mayoría de sus seguidores, sin embargo, "se comprometieron sin ambigüedades tanto a la materialidad de la luz como al papel de las fuerzas".[22]

3. El éter de Euler

En 1746 Leonhard Euler publicó un nuevo trabajo acerca de la luz y los colores en el que exponía su propia versión de la teoría ondulatoria.[23] Aunque la anunció como una nueva teoría, sabía que Descartes "y muchos otros científicos" habían sostenido que la luz se propaga de una manera similar al sonido.[24] Rechazando la acción a distancia, postula la existencia de un éter –un fluido sutil y elástico que ocupa todo el espacio que los otros cuerpos no ocupan. La luz se propaga a través de este éter, así como el sonido lo hace a través del aire. Entonces la luz es una serie de ondas de presión longitudinales que pasan por el éter. Aunque el éter no tiene gravedad, sí tiene densidad. Los pulsos se propagan en forma de ondas periódicas, y la frecuencia de las vibraciones determina el color. Como observa David Speiser: "Solo por medio de esta conexión entre los colores y las propiedades periódicas de la luz puede uno hablar de óptica ondulatoria en un sentido adecuado".[25] En otra parte hace notar que

> solo por medio de la caracterización de Euler del color por una frecuencia podría la óptica ondulatoria asentarse en su cimiento definitivo [...] Solo después de que la importancia de la periodicidad fuera reconocida y aclarada podría hablarse de óptica ondulatoria en un sentido adecuado.[26]

Ignorando la obra de Malebranche, el autor de estos enunciados presenta a Euler como el primero en conectar el color con la frecuencia de ondas. Es cierto, sin embargo, que mientras Malebranche no consideró su hipótesis más que una especulación, Euler no solo introdujo el concepto de frecuencia en este contexto, sino que también lo utilizó para desarrollar cálculos y hacer predicciones. Goethe, en su historia de la doctrina de los colores, describió a Euler como "uno de aquellos hombres destinados a comenzar de nuevo, a pesar de la rica cosecha que heredaron de sus predecesores".[27]

La teoría de Euler, empero, poco podía hacer para oponerse a las objeciones que prevalecían a la postulación de ondas luminosas. Defendió la propagación rectilínea negando que el sonido se desvíe alrededor de un obstáculo, y argumentando que un pulso siempre tiende hacia una cierta dirección específica. Si se desviaba, también iría hacia atrás, y esto iba en contra tanto de la teoría como del experimento.[28] Euler no usa las óndulas secundarias de Huygens o su principio. Deriva la ley de refracción, por ejemplo, apelando al principio de que el frente de onda (aunque no usa ese término) debe estar en ángulos rectos a la dirección de la propagación.[29] Esto evitaría que encontrara una explicación para la refracción doble. Así como Huygens, no toma en consideración la difracción de la luz alrededor de objetos pequeños.

Durante el siglo XVIII, la teoría ondulatoria de la luz permaneció desmembrada, solo con apoyo caprichoso, y por tanto fue víctima fácil de los ataques newtonianos.[30] Cambiar la teoría de los corpúsculos de luz por aquella de las ondas etéreas habría causado que toda la estructura de la óptica newtoniana colapsara y no habría provisto posibilidad de una alternativa, ya que las teorías ondulatorias de la luz no habían llegado a un grado comparable de perfección y compleción.

La teoría de la luz de Euler es en realidad una teoría del éter. Desde el inicio tuvo que defenderla contra la objeción de que el éter, si existiera, frenaría el movimiento de los planetas. Lo hizo calculando cuán insignificante sería este efecto, pero su argumento también podía usarse para probar que las partículas de luz newtonianas tenían un efecto insignificante en los movimientos de los planetas. Después de todo, un motivo importante y más o menos consciente para rechazar las teorías del éter en la segunda mitad del siglo XVIII podría haber sido que recordaban a los newtonianos del rechazo reciente a los vórtices de Descartes.

En 1788, John Robison, un seguidor escocés convencido de la teoría corpuscular de la luz, objetó a las teorías ondulatorias de Hooke, Huygens y Euler que "la propagación del movimiento trémulo de un fluido elástico es totalmente inconsistente con" la

propagación rectilínea, y no "concordante con los principios de la mecánica".[31]

Resumiendo, se puede decir que la intentada reversión a las ondulaciones en el éter falló porque no estaba acompañada por ninguna explicación exitosa de un fenómeno que quedó antes sin explicar, y porque no consiguió desarrollar alguna nueva técnica o modelo matemáticos.[32]

C. El avance final

1. La analogía de Young

Thomas Young fue médico, y por el tiempo en que tomó el tema de la naturaleza de la luz ya había mostrado interés en la visión (1793) y en la voz humana (1796). Sus experimentos con el sonido (1799) lo convencieron de que el argumento de Newton contra las teorías ondulatorias de la luz basado en la analogía entre la luz y el sonido era erróneo; el sonido no diverge alrededor de una apertura tanto como Newton había supuesto.[33] Su objeción a las teorías newtonianas de la luz era que no podían explicar la velocidad constante de la luz, que era evidentemente independiente de su fuente, o de la reflexión y refracción parciales.[34] Por tanto tuvo el atrevimiento de asegurar que hay una analogía entre los colores de películas delgadas y el sonido de los tubos de órgano de diferente longitud. Lo que es más, por vez primera, hizo uso de su principio de interferencia, aplicándolo al fenómeno de los ritmos en el sonido.[35]

Pronto tuvo que enfrentar un contraataque de la óptica newtoniana. En 1804 dio un discurso bakeriano sobre "Experimentos y cálculos relativos a la óptica física". Cuando se hizo público, Henry Brougham escribió:

> Otra disertación bakeriana que contiene más imaginaciones, más errores, más hipótesis sin fundamento, más ficciones gratuitas, todo sobre el mismo campo en que Newton anduvo, y todo del fértil aunque infructuoso cerebro del mismo eterno doctor Young.[36]

Atacando tanto a Young como a Wollaston, Broughan continuó:

> Estos autores, engañados por la naturaleza del sonido, no admiten la materialidad de la luz, sino que aseguran que es una vibración propagada a través del medio... una hipótesis insostenible e inútil.[37]

2. El descubrimiento de Malus

En 1810, en recuerdo de la doble refracción, el oficial francés Ettienne Louis Malus anunció su descubrimiento, hecho en 1808, de que la luz reflejada desde una superficie no metálica muestra, a mayor o menor grado, dependiendo del ángulo de reflexión, las propiedades de un rayo ordinario o extraordinario de refracción doble. Lo demostró utilizando un método del experimento de Huygens con los dos cristales de calcita, y distinguiendo entre los dos tipos de rayo haciendo pasar el rayo reflejado a través de un cristal, provocando doble refracción. También describió un experimento con nada más que dos placas de cristal, para demostrar claramente lo significativo de su descubrimiento. Un rayo de luz incide en la primera placa de cristal a un ángulo de 54º 35'. El rayo reflejado se hace caer en la segunda placa de cristal al mismo ángulo de incidencia, pero los planos de incidencia se acomodan para estar a ángulos rectos uno del otro. Entonces no se reflejará ninguna luz por la segunda placa de cristal.[38]

Malus transformó su descubrimiento en un argumento decisivo contra la teoría ondulatoria de la luz:

> Si los simples fenómenos de reflexión son distintos para el mismo ángulo de incidencia –lo que no puede ocurrir en el caso del sistema ondulatorio–, uno debe necesariamente concluir no solo que la luz es una sustancia en la que actúan fuerzas que actúan en otros cuerpos, sino también que la forma y disposición de sus partículas tiene una gran influencia sobre los fenómenos.[39]

Apoyó la conclusión de Newton de que las partículas de la luz tienen diferentes lados. En la Cuestión veintiuno (1706, 29 en 1717) de *Óptica*, Newton había comparado la acción del espato de Islandia sobre las partículas de la luz con un efecto magnético, añadiendo sin embargo: "No estoy diciendo que esta virtud sea

magnética". Malus atribuye dos polos a cada partícula de luz. La sustancia reflectante ejerce fuerzas que rotan los polos alrededor del centro de gravedad de la partícula, tal como el campo magnético de la Tierra orienta una aguja magnetizada.[40]

3. Las ondas transversales de Fresnel

Mientras que las duras críticas a que se expuso Young lo mantuvieron cauto con respecto a proponer una teoría ondulatoria de la luz, el descubrimiento de Malus se lo impidió en realidad. Tuvo que admitir que provocó grandes dificultades a la teoría ondulatoria. En una revisión de una memoria de Laplace acerca de la ley de refracción, publicada en 1809, mencionó

> los experimentos del señor Malus sobre la polaridad aparente, como se muestra por la reflexión oblicua, que presentan mayores dificultades a los partidarios de la teoría ondulatoria que cualquier otro hecho que conozcamos.[41]

Creyó, sin embargo, que una teoría ondulatoria proporcionaba la mejor explicación para la mayoría de las propiedades de la luz. Para explicar las polarizaciones, entonces, se tiene que buscar en el tema de las ondas transversales. Sin embargo estas fueron útiles tan solo como símbolos o analogías, dado que el éter fue concebido como un fluido susceptible solo a las ondas longitudinales. También debía ser un fluido que no ofreciera resistencia al movimiento de los cuerpos.

En Francia, de 1815 en adelante, Augustin-Jean Frensel había comenzado a desarrollar una teoría ondulatoria de la luz. En 1816 descubrió que los rayos polarizados en ángulos rectos uno del otro no se interferían. El 29 de abril de 1818, Young escribió a Françóis Arago en París, comparando las vibraciones de la luz polarizada con las de una cuerda flexible. Arago era amigo y colaborador de Fresnel, ya habían hecho bastante trabajo juntos con la teoría ondulatoria de la luz. En 1821 Fresnel concluyó de sus experimentos y cálculos que la luz debía consistir de líneas transversales en el éter. Desde ese momento, Arago no pudo seguir más la línea de razonamiento de Fresnel,[42] como declararía en

1851. Fresnel fue capaz, sin embargo, de llevar a la perfección la teoría ondulatoria de la luz sobre la base de su hipótesis de las ondas transversales en el éter elástico.

N O T A S

[1] En 1704 Newton también derivó la ley de los senos de refracción en *Óptica*, libro I, experimento 15, y libro II, parte III, proposición 10.

[2] Hegel dice que la idea de Newton sobre un rayo es barbárica, *Encyclopedia* § 276; MM 9.117; tr. Petry II.17,33; tr. Miller p. 92. Hegel trata con la refracción de la luz como el segundo aspecto en "la relación de materia individualizada con la luz", o. c. § 318; MM 9.228, 230 y ss.; tr. Petry II.125-133; tr. Miller pp. 185-192.

[3] Hegel quiere eliminar de la óptica todas las explicaciones por medio de corpúsculos, ondas y oscilaciones. *Encyclopedia* § 276, MM 9.118; tr. Petry II.19,3; tr. Miller p. 93.

[4] Hooke, R. 1665, pp. 55-56.

[5] Hooke, R. 1665, p. 57.

[6] Newton C I.175.370. La carta de 1672 fue publicada en *Philosophical Transactions* 7 (1672). Cf. lo que Newton escribe en la Cuestión 20 (1706; 28 en 1717) en *Óptica*.

[7] Ziggelaar, A. 1980.

[8] Hegel discute la doble refracción en *Encyclopedia* § 319; MM 9.239-241; tr. Petry II.133-134; tr. Miller pp. 192-194.

[9] Huygens, C. 1690; Huygens, C. 1962.

[10] Huygens, C. 1690, p. 3; Huygens, C. 1962, p. 3.

[11] Escolio (c) a la carta de Newton fechada el 6 de febrero de 1672 dirigida a Henry Oldenburg, publicada en *Philosophical Transactions* 6 (1671/72), 3075-87. Citada de Newton C I.106.

[12] Newton C I.370.

[13] Halley, E. 1693.

[14] Malebranche, N. 1945, Discurso XII.

[15] Cantor, G. N. 1983, p. 12.

[16] Malebranche, N. 1946, p. 186.

[17] Malebranche, N. 1946, p. 161. Hegel aceptó que la propagación de la luz toma tiempo, pero sugirió que uno no debería satisfacerse en sus consecuencias espectrales para objetos en el cielo a distancias de muchos años-luz. *Encyclopedia* § 276; MM 9.120-121; tr. Petry II.21.5; tr. Miller p. 94.

[18] Grimaldi, F.-M. 1665. Hegel menciona difracción de la luz en *Encyclopedia* § 320 (adición, sección γ); MM 9.259; tr. Petry II.151,3-25; tr. Miller pp. 208-209.

[19] Grimaldi, F.-M. 1665, libro I, prop. 22.

[20] Stuewer, R. 1970, p. 204.

[21] Cf. la valoración de Hegel de los llamados rayos de luz de cuatro lados, *Encyclopedia* § 278; MM 9.124; tr. Petry II.23,27-40; tr. Miller p. 97.

[22] Cantor, G. N. 1983, p. 31. Hegel rechaza la "física de las partículas de la luz" en *Encyclopedia* § 276; MM 9.119; tr. Petry II.17,30-18,1, tr. Miller p. 92.

[23] Euler, L. 1746. Ver también Euler, L. 1812, cartas CXXXIII-CXXXVI, pp. 86-104.

[24] Euler, L. 1746, ch. I, § 3, p. 2.

[25] Euler, L. 1746, p. XIV.

[26] Euler, L. 1746, p. LIV.

[27] Goethe, J. 1962, p. 222.

[28] Euler, L. 1746, ch. 2 § 52, p. 18.

[29] Euler, L. 1746, ch. 4, § 76, pp. 27-28.

[30] Steffens, H. 1977, p. 104.

[31] Robinson, J. 1788, pp. 97-98. Citado en Steffens, H. 1977, p. 84.

[32] Steffens, H. 1977, p. 67. De acuerdo con Hegel ni la teoría de Newton ni la teoría ondulatoria y el éter de Euler son de utilidad alguna para el conocimiento con respecto a la luz: *Encyclopedia* § 276; MM 9. 120; tr. Petry II.20,10-21; tr. Miller, p. 94.

[33] Young, Th. 1800, § II, p. 112 y § VI, pp. 118-119.

[34] Young, Th. 1800, § X, pp. 125,127.

[35] Young, Th. 1800, § X, p. 128 y § XI, pp. 130-131. Hegel sabe que se supone que la "sombra en la luz" (¿interferencia destructiva?) es un triunfo y avance sobre Newton en sus tiempos, pero sostiene que no es física dado que no es empírica: *Encyclopedia* § 276 (adición); MM 9.120; tr. Petry II.20,13-19; tr. Miller p. 94.

[36] Brougham, H. 1804, p. 97. Citado en Steffens, H. 1977, p. 129.

[37] Brougham, H. 1802, p. 99. Citado de Young, Th. 1855, p. 205.

[38] Malus, E. 1810.

[39] Malus, E. 1810, § 54, p. 239.

[40] Malus, E. 1810, § 54, p. 240. Hegel hace referencia, en conexión con el "concepto torpe" de la polarización de la luz por medio de dos espejos, a Goethe: *Encyclopedia* § 278; MM 9.123-124; tr. Petry II.23,25; tr. Miller p. 97.

[41] *Quarterly Review* nov. 1809. Citado en Young, Th. 1972, p. 233.

[42] Verdet, E. 1872, p. 351.

Ensayos de óptica. Newton y la naturaleza de la luz,
editado por la Universidad Autónoma de Chihuahua
y la Universidad Nacional Autónoma de México,
se terminó de imprimir en offset el 14 de noviembre de 2016
en los talleres de Gráfica Premier, S. A. de C. V.,
ubicados en Calle 5 de Febrero núm. 2309, colonia San Gerónimo
Chicahualco, C. P. 52170, municipio de Metepec, Estado de México.
Para su composición se utilizaron los tipos Bodoni BT-Book
y Times New Roman de 12 puntos. Los interiores se imprimieron
en papel Unibond marfil de 75 g y los forros en couché de 350 g.
El tiro fue de 1 000 ejemplares.

Edición y formación